



#### 工學碩士 學位論文

# 항만 입구 수로의 세장형 복합방파제로부터 발생하는 연파의 해석

Analysis of Stem Wave due to a Series of Long Breakwaters at the Entrance Channel



2019年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

權晟玟

本 論文을 權晟珉의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

# 委員長 工學博士 김 태 형(印) 委 員 工學博士 오 재 홍(印) 委 員 工學博士 이 중 우(印)

## 韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

## 權晟珉



# Analysis of stem wave due to a series of long breakwaters at the entrance channel

Seong-Min Kwon

Department of Civil and Environmental Engineering Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

#### Abstract

This study analyzed and investigated the characteristics of the stem wave due to a series of long breakwaters at the entrance channel. The target structures are 1800m and 900m long breakwaters located at the front of Samcheok LNG production base of KOGAS, which had been constructed to allow mooring stability at the berth of the LNG vessel for natural gas supply in Gangwon and Yeongnam areas.

Under a certain condition, wherein the incident angle of waves is smaller than a critical angle to the vertical breakwater or sea dike, waves propagating along the front of the structures will be generated in addition to incident waves and reflected waves which is defined as a stem wave, and this causes maneuvering difficulty to the passing vessels and also it may bring erosion of shoreline with additional damages to berthing facilities.

Thus, in this study, we have investigated the response of stem wave at the vertical breakwater near the entrance channel and applied numerical models which are commonly used for the analysis of wave response at the harbor design. The basic equations composing models here adopted both the linear parabolic approximation adding the nonlinear dispersion relationship and nonlinear parabolic approximation adding linear dispersion relationship.



In order to analyze the applicability of both models, we compared the numerical results with the existing hydraulic model results.

The difference of the stem wave amplification along the vertical breakwater is not significant and the regular wave model with non-linear dispersion relation shows undulation, whereas the Boussinesq model shows smooth response. In general the stem wave height increases at early stage but becomes stable after about 8 wave length away from the structure tip.

The gap of serial breakwaters and aligned angle cause more complicate stem wave generation and it was found a secondary stem wave form through the breakwater gap. Although the clear development of stem wave pattern did not appear, it was found a secondary stem wave form through the breakwater gap. There might be a possible stem wave development at the lee side of breakwaters through the gap depending on the incident wave direction. This impact should be included in the analysis of waterway tranquility near the breakwaters in the approaching channel.

Those analyzed results are to be applied to ship handling simulation study at the approaching channel, together with the mooring test.



ABSTRACT i
LIST OF TABLES v
LIST OF FIGURES vi
제1장 서론1
1.1 연구 배경1
1.2 연구 내용 및 목적
제2장 수치모델의 기초이론
2.1 확장형 완경사 방정식 해석모델9
2.2 Boussinesq 방정식 해석모델21
2.3 수치모델의 적용성 검토29
2.3.1 확장형 완경사 방정식 해석모델의 적용성 검토
2.3.2 Boussinesq 방정식 해석모델의 적용성 검토 40
제3장 수치모델의 수립
3.1 대상해역의 특성
3.2 대상해역의 조건
3.2.1 기상 조건
3.2.2 해상 조건

3.3 대상구조물의 조건	··· 56
3.3.1 A breakwater ·····	··· 56
3.3.2 B breakwater	57

34 수치모덱의 구섯	
	00
3.4.1 규칙파 해석모델의 구성	58
3.4.2 불규칙파 해석모델의 구성	····· 58
3.4.3 파랑제원의 구성	····· 62

제4장 수치모델실	험의 결과 및 분석	····· 64
4.1 규칙파 해석모	델의 실험결과	····· 64
4.2 불규칙파 해석	모델의 실험결과	····· 71

제5자 견로		
	HARTIME AND OCEAN CHILE	05
잠고문헌		



### LIST OF TABLES

Hydraulic model experiment conditions under regular wave ..... 31 Table 2.1 Table 2.2 Table 2.3 Numerical model experimnet conditions under regular wave .... 33 Hydraulic model experiment conditions under irregular wave  $\cdot \cdot 42$ Table 2.4 Table 2.5 Numerical model experiment conditions under irregular wave  $\cdot$  44 Table 3.1 Design waves of deep and shallow water for the object area  $\cdot 54$ Table 3.2 Numerical model experiment conditions under regular wave .... 60 Table 3.3 Numerical model experiment conditions under irregular wave  $\cdot$  62 Table 3.4 Table 3.5





## LIST OF FIGURES

Fig.	1.1	Example of damage at harbor structure due to wave force $\cdots \cdots 2$
Fig.	1.2	Reflection patterns of solitary wave(Perroud, 1957)
Fig.	1.3	Spatial distribution characteristics of stem wave4
Fig.	1.4	Serial breakwaters at samcheok LNG production base
Fig.	1.5	Schematic flow of research
Fig.	2.1	Definition sketch of model domain
Fig.	2.2	Experimental setup for analysis of regular wave(Lee & Yoon, 2006)
Fig.	2.3	Sectional view of experimental structure(Lee & Yoon, 2006)
Fig.	2.4	Numerical mesh of CG-WAVE for examination of applicability $\cdots 34$
Fig.	2.5	Wave height distribution of CG-WAVE, $= 10^{\circ}$ , $\beta = 19^{\circ}$
Fig.	2.6	Wave height distribution of CG–WAVE, $\beta = 28^{\circ}$
Fig.	2.7	Wave height distribution of CG-WAVE(detail), $\beta = 10^{\circ}$ , $\beta = 19^{\circ}$ 35
Fig.	2.8	Wave height distribution of CG-WAVE(detail), $\beta = 28^{\circ}$
Fig.	2.9	Comparison of normalized wave height along the $breakwater(x)$
		from regular wave model, $\beta = 10^{\circ}$
Fig.	2.10	Comparison of normalized wave height perpendicular to the
		breakwater(y) from regular wave models, $\beta\!=\!10^\circ$ 37
Fig.	2.11	Comparison of normalized wave height along the $breakwater(x)$
		from regular wave model, $\beta \!=\! 19^\circ$
Fig.	2.12	Comparison of normalized wave height perpendicular to the
		breakwater(y) from regular wave models, $\beta\!=\!19^\circ$ 38
Fig.	2.13	Comparison of normalized wave height along the $breakwater(x)$
		from regular wave model, $\beta\!=\!28^\circ$
Fig.	2.14	Comparison of normalized wave height perpendicular to the
		breakwater(y) from regular wave models, $\beta = 28^{\circ}$

- vi -

Fig.	2.15	Experimental setup for analysis of irregular wave(Lee & Yoon,
		2008)
Fig.	2.16	Sectional view of experimental structure(Lee & Yoon, 2008)42
Fig.	2.17	Numerical mesh of BOUSS-2D for examination of applicability $\cdots 44$
Fig.	2.18	Wave height distribution of BOUSS-2D, $=\!10^{\circ}$ , $\beta\!=\!19^{\circ}$ 45
Fig.	2.19	Wave height distribution of BOUSS-2D, $\beta{=}28^\circ$ 45
Fig.	2.20	Wave height distribution of BOUSS-2D(detail), $\beta\!=\!10^\circ$ , $\beta\!=\!19^\circ$ 46
Fig.	2.21	Wave height distribution of BOUSS-2D(detail), $\beta\!=\!28^\circ$ 46
Fig.	2.22	Comparison of normalized wave height along the $breakwater(x)$
		from irregular wave model, $\beta\!=\!10^\circ$ 48
Fig.	2.23	Comparison of normalized wave height perpendicular to the
		breakwater(y) from irregular wave models, $\beta = 10^{\circ}$
Fig.	2.24	Comparison of normalized wave height along the $breakwater(x)$
		from irregular wave model, $\beta = 19^{\circ}$
Fig.	2.25	Comparison of normalized wave height perpendicular to the
		breakwater(y) from irregular wave models, $\beta = 19^{\circ} \cdots 49$
Fig.	2.26	Comparison of normalized wave height along the $breakwater(x)$
		from irregular wave model, $\beta = 28^{\circ}$
Fig.	2.27	Comparison of normalized wave height perpendicular to the
		breakwater(y) from irregular wave models, $\beta\!=\!28^\circ$
Fig.	3.1	Location map of object area
Fig.	3.2	Bathymetry of object area
Fig.	3.3	Counter and water facilities of samchoek LNG production base $\cdots 55$
Fig.	3.4	Long and serial breakwaters at object area
Fig.	3.5	Sectional view of serial breakwaters(A breakwater)57
Fig.	3.6	Numerial mesh of CG-WAVE under regular wave condition 60
Fig.	3.7	Numerical mesh of BOUSS-2D under irregular wave condition $\cdots 61$
Fig.	3.8	Considered wave direction for evaluation of stem wave

Fig.	4.1	Wave height distribution of CG-WAVE, wave direction= $350^{\circ}(N)$ 67
Fig.	4.2	Wave height distribution of CG–WAVE, wave direction=12°(N) $\cdots 68$
Fig.	4.3	Wave height distribution of CG-WAVE, wave direction= $127^{\circ}(S)$ 69
Fig.	4.4	Wave height distribution of CG-WAVE, wave direction=160°(S) $$ 70 $$
Fig.	4.5	Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction=350°(N) 74
Fig.	4.6	Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction=12°(N) $\cdots 75$
Fig.	4.7	Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction= $127^{\circ}(S)$ 76
Fig.	4.8	Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction=160°(S) 77 $$
Fig.	4.9	Relative wave height of distance along the structure,
		wave direction=350°(N)79
Fig.	4.10	Relative wave height of normal to the structure,
		wave direction=350°(N)
Fig.	4.11	Relative wave height of distance along the structure,
		wave direction=12°(N)80
Fig.	4.12	Relative wave height of normal to the structure,
		wave direction=12°(N)80
Fig.	4.13	Relative wave height of distance along the structure,
		wave direction=127°(S)
Fig.	4.14	Relative wave height of normal to the structure,
		wave direction=127°(S)
Fig.	4.15	Relative wave height of distance along the structure,
		wave direction=160°(S)
Fig.	4.16	Relative wave height of normal to the structure,
		wave direction=160°(S)
Fig.	4.17	Relative wave height of distance along the structure,
		north series83
Fig.	4.18	Relative wave height of distance normal to the structure,
		north series83
Fig	/ 10	Relative wave beight of distance along the structure

Fig. 4.19 Relative wave height of distance along the structure,

– viii –

	south series	84
Fig. 4.20	Relative wave height of distance normal to the structure,	
	south series	84





#### 제1장서론

#### 1.1 연구 배경

해상수송 및 육상수송의 중계점이자 효율적인 물류체계의 구축을 통해 국 가경제의 성장과 국민의 삶의 질 향상에 기여하는 현대의 항만은, 급격한 시 대의 변화와 지속적인 기술혁신이라는 세계적인 흐름에 편승하여 그 역할과 기능을 확장하고 있다. 특히나 규모의 경제를 바탕으로 화물의 운송비용을 절감하고 이를 통해 수익성의 향상을 도모하고자 하는 해운산업분야의 요구 는 선박건조기술 및 정보통신의 발달을 기반으로 선박의 대형화를 가속화 시 키고 있다. 이러한 선박의 대형화 추세로 인해 항내 접안 시설 및 접근 수로 를 위한 충분한 수심확보의 필요성이 대두되고 있으며, 이로 인해 항만 구조 물의 계획 수심 또한 점차적으로 증가하고 있다. 항내의 선석 및 방호 부두, 방파제와 같은 대형 항만 구조물들은 대부분 직립 구조물 형상을 띄고 있으 며 특히, 방파제의 경우 내습하는 파랑에너지의 소산을 통해 항내 정온도 확 보하고자 하는 본연의 목적을 달성하기 위해서는 여전히 경사제 형상이 유리 하지만, 건설비용의 경제적 효율성 및 환경영향을 고려한 직립제 형상이 현 장에서 주로 채택된다. 또한 직립 구조물 형상은 기존의 항만 구조물들과의 결합에도 용이하여 향후 항만의 확장 계획 시 절차의 순조로운 진행이 가능 하다. 반면, 직립 형상의 항만 구조물은 일정 입사각도 이하의 입사파랑에 의 해 구조물 전면을 따라 진행하며 점진적인 파고 상승을 유발하는 연파(stem wave)를 발생시킨다. 여파 혀상은 파랑의 구조물 배후면 회절혀상과 아울러 구조물 전면 회절현상으로 취급되며, 연파로 인한 구조물 전면의 파고 및 파 력의 상승은 처올림 높이 상승. 월파량의 증가와 함께 구조물의 파괴 및 기 저부의 안전성 문제를 야기하며, 항내 정온도 및 선박의 운행에 영향을 미치



- 1 -

고 구조물 전면의 수위상승으로 인한 해안재해를 유발한다(Fig. 1.1). 한편, 현재까지 진행파에 대한 직립 구조물의 안정성 연구는 다수 진행되어 왔지 만, 실제 해역의 연안 및 항로 입구에 위치한 항만 구조물로 인한 파랑변형 연구는 미비한 실정이다.



Fig. 1.1 Example of damage at harbor structure due to wave force

Perroud(1957)는 고립파를 적용한 수리실험으로부터 직립방파제 또는 직 립안벽 등과 같은 직립구조물에 파랑이 45°이하로 경사지게 입사하게 되면 입사파, 반사파 및 연파가 존재함을 밝혔으며, Fig. 1.2는 이 결과를 바탕으로 입사파랑의 입사각이 45°이하인 경우에 대해 제안한 연파의 발생메커니즘이 다.



Fig. 1.2 Reflection patterns of solitary wave(Perroud, 1957)

여기서, 는 입사파랑과 구조물이 이루는 각, λ는 반사파랑과 구조물이 이루는 각, 는 구조물 벽면의 법선방향으로 형성되는 연파의 파봉폭(wave crest width)을 나타낸다.

(a) a > 45° 일 때, 구조물 전면에서 입사파와 반사파는 동일한 각도로 중 첩되어 전형적인 반사패턴만 나타나며 연파는 발생하지 않는다.

(b) 20° < a < 45°일 때, 구조물 전면으로부터 수직방향으로 연파의 파봉이 존재하며, 연파는 벽으로부터 일정한 폭을 갖고 발생한다.

1945

(c) a < 20°일 때, 반사파는 사라지게 되고 입사파와 연파만이 존재한다.

연파의 수리적 특성에 대해 Perroud(1957), Chen(1961) 및 Weigel(1964)은 직립구조물에 경사지게 입사하는 고립파(solitary wave)를 대상으로 한 연구 결과를 제시하였고, Nielsen(1962)과 Hager(1975)은 단일성분파랑을 대상으로 파랑의 Mach-reflection 효과에 대한 연구 결과를 제시하였다. 이를 통해 연 파의 수리적 특성을 종합하면 다음과 같다. 첫째로, 입사파랑이 고립파일 경

우, 파랑의 입사각도()가 증가함에 따라 연파의 파고( <sub>t</sub>)는 증가하며, 이와 같은 현상은 단일성분파랑에서도 마찬가지로 나타난다. 두 번째로, 연파의 파 고와 연파의 폭은 입사파랑의 전파방향을 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 마지막으로, 파랑의 입사각도가 증가함에 따라 연파의 폭(*B*)은 감소한다.

또한, Park(2002)은 파랑변형현상의 재현에 적용성이 뛰어난 비선형 회절· 굴절 모델인 REF/DIF1(Kirby and Dalrymple, 1993)을 이용하여 연파의 공간 적 분포 특성을 구조물의 연행방향 및 법선방향의 단면적 파고분포의 변화에 따라 파악하고, 연파 파고의 최대값을 산정하여 입력변수의 영향에 대해 정 량적으로 살펴보았다.



Fig. 1.3 Spatial distribution characteristics of stem wave

앞서 언급한 연구들을 포함하여, 연파에 대한 많은 연구들이 종전에 진행되 어 왔다. Mase et al.(2002)는 직립 구조물에 입사하는 불규칙 파랑에 대한 연파해석을 연구하였으며 특히, 구조물 전면에서의 연파 성장 및 쇄파의 영 향을 고려한 규칙파와 불규칙파의 응답해석을 비교 제시하였다. Lee and Yoon(2006)은 직립벽을 따른 규칙파의 연파특성을 평면수조를 이용한 수리실 험과 포물형 근사식을 이용한 수치해석을 통하여, 입사파랑의 입사각이 작아 지고 입사파의 비선형성이 증가할수록 연파의 파고는 감소하며, 연파의 폭은 증가한다는 해석결과를 제시하였다. 또한 Lee and Yoon(2008)은 직립벽을 따 른 불규칙파의 연파특성을 확인하기 위해, 평면수조를 이용한 수리모형실험 과, Kirby and Őzkan(1994)에 의해 개발된 REF/DIF S 모형을 이용한 해석 결과를 통해 제체 전면을 따른 상대파고는 규칙파 및 불규칙파 모두 유사하 게 나타났으나. 제체 직각방향의 파고분포 경향은 매우 큰 차이를 보임을 제 시하였다. Yoo et al.(2010)는 파랑의 규칙성에 관계없이 파랑의 입사각도( ) 와 직립 구조물의 접선 방향에 따른 연파의 규모의 상관관계에 대한 연구를 진행하였다. 하지만 연파에 대한 종전의 연구들은 그 대상이, 일정 주기를 지 닌 규칙파 혹은 고립파에 편중되어 왔으며, 입사파랑의 입사각 및 비선형성 에 따른 연파의 성장 및 특성에 대해서만 주로 다루어져 왔다. 본 연구에서 다루고자 하는 실해역 조건 하에서 발생하는 불규칙 입사파랑에 따른 연파의 특성에 관한 연구는 비교적 최근에서야 진행되고 있다.



#### 1.2 연구 내용 및 목적

본 연구의 대상지역인 한국가스공사(KOGAS) 삼척본부는 강원 삼척시 원 덕읍 일대에 위치한 LNG 생산기지로서 평택·인천·통영에 이은 국내 4번째 생산기지이다. 삼척 LNG 생산기지는 약 98만 의 부지에 LNG 저장탱크 12 기(27만kt급 3기, 20만kt급 9기)와 시간당 1,320톤 규모 ORV식 기회송출설 비, LNG 선 12.7만 DWT(27akskt급) 1선좌 접안설비를 갖추고 있으며, LNG 생산기지의 항내 정온도 및 선박과 LNG 생산설비의 보호를 위한 국내 최대 길이 1.8km의 케이슨 방파제 및 LNG 생산기지와 인접해 있는 삼척 화력발 전소 전면 해안에 위치한 900m 길이의 동방파제가 LNG 생산기지 전면에 위 치하고 있다. 이들 방파제는 본 연구의 해석 대상인 세장형1) 복합방파제20의 배치로 자리 잡고 있으며 특히, 연구 대상해역은 지리적 특성(동해안)상 단조 로운 해안선과 미약한 섬의 발달로 인해 외해로부터 열려있어 파랑의 영향이 지배적이고, 최근 들어 이상 고파랑 내습빈도가 지속적으로 증가하고 있어 항만 구조물에서 발생하는 연파의 반응특성을 해석하는데 적합하다고 사료된 다.



1) 세장형(細長型): 가늘고 긴 형태

<sup>2)</sup> 복합방파제 : 두 개의 방파제가 이격 구간을 두고, 시리즈(series) 형태로 배치된 구 조



#### Fig. 1.4 Serial breakwaters at samcheok LNG production base

본 연구에서는 항만설계 시 파랑응답해석에 공통적으로 사용되는 수치모델 을 통해 실제 해역의 조건 하, 대상지역의 세장형 복합 방파제에서 발생하는 연파의 특성을 분석하고자 하였으며, 구조물에 입사하는 파랑의 특성은 규칙 파(regular wave)와 불규칙파(irregular wave)로 분류하였다. 수치모델실험에 사용된 해석모델은 규칙파랑 해석을 위한 CG-WAVE 와 불규칙 파랑 해석 을 위한 BOUSS-2D으로 구성되어 있으며, 규칙파랑 해석모델의 지배 방정식 은 선형 타원형 근사식과 비선형 분산 관계식을 적용한 N 형식이며, 불 규칙파랑 해석모델의 지배 방정식은 비선형 포물선 근사식과 선형 분산 관계 식을 적용한 N-L 형식이다.

본 연구과정은 Fig. 1.5와 같으며 동해상에 위치한 2개소의 기상청 해상관 측부이의 파랑기록을 수집 및 분석하여 연파를 유발할 할 수 있는 입사각을 지닌 4종류의 이벤트성 파랑제원을 도출, 이들 파랑이 세장형 복합방파제에 내습했을 경우의 시나리오를 수치모델실험을 통해 해석하여 구조물의 길이 및 법선방향에 따른 파고 분포의 변화를 분석하고자 한다. 추가적으로 세장 형 복합방파제에서 발생하는 일반적인 형태의 연파 외에, 방파제 간의 이격 구간으로 인해 발생하는 복잡한 형태의 2차 연파의 발달을 확인하고자 한다. 따라서 제 2장에서는 수치모델의 기초이론 제시와 검증을 수행하고, 제 3장 에서는 대상 해역의 특성과 수치모델의 구성 및 적용성을 검토하였다. 제 4 장에서는 수치모델실험의 결과를 해석모델에 대하여 제시 및 분석을 수행하 였으며, 이를 제 5장에서 요약 및 정리하고자 한다.

이와 같은 연구를 통해 도출된 결과는 실제 해역의 연안 및 항로 입구에서 항행하는 상황을 가장한 선박운항시뮬레이션 또는 선박의 계류안정 테스트에 적용할 수 있으며, 향후 복합방파제에서 발생할 수 있는 2차 연파의 저감을 위한 연구의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

# Numerical Simulate of the Stem wave

CG-Wave ; regular wave model *L-N Type*  BOUSS-2D ; irregular wave model *N-L Type* 

Examine applicability of models ; comparison with Laboratory Experiment Results

Application to Field Breakwaters ; <u>Samcheok LNG Production Base</u>

Confirm Characteristics of Stem Wave in Field

Fig. 1.5 Schematic flow of research



#### 제 2 장 수치모델의 기초이론

대상해역에 위치한 세장형 복합 방파제에서 발생하는 연파의 특성을 확인 하기 위하여 2가지 수치모델을 적용하였다. 구조물 입사 파랑의 특성에 따라 규칙파랑(regular wave)의 해석은 확장형 완경사방정식 모델을, 불규칙파랑 (irregular wave)의 해석은 Boussinesq 방정식 모델을 적용하여 비교 분석을 하였다. 각 모델의 기초이론은 다음과 같다.

#### 2.1 확장형 완경사 방정식 해석모델

본 연구의 해석모델은 미육군공병단(U.S. Army, Corps of Engineers)와 Maine 대학교에서 개발한 모델으로 확장형 완경사 파랑 방정식을 지배방정식 으로 갖는 2D 유한요소(finite element)모델이다. 확장형 완경사 파랑 방정식의 기초가 되는 기초방정식은 완경사방정식(Mild Slope Equation)으로서 이는 Berkhoff(1972)에 의해 파랑의 회절·굴절을 포함한 방정식으로서 정상파동장에 대해 식 (2.1)으로 제안되었다.

$$\cdot (C \nabla \eta) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0$$
(2.1)

## $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ ; 각주파수 (radians/sec)

이 식은 해저경사 h 의 오더를 무시하고 있기 때문에 완경사방정식으로 언급되며, 파랑의 회절(diffraction) · 굴절(refraction) · 반사(reflection) · 천수 변형(shoaling)을 충분히 재현하고 있기 때문에 파랑변형 수치모델실험에 빈번 하게 이용되었다. 하지만, 실제 해석대상인 항만이나 연안역에 대한 수치모델실 험은 계산영역을 한정할 수밖에 없으며, 이로 인해 발생하는 경계면의 처리방 식이 해석의 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 해저마찰, 경계면흡수, 반사파의 산란(scattering)등을 고려하지 않은 완경사방정식을 적용하기에는 다소 무리가 따른다. 그리하여 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하고 수치해석의 정도를 높이기 위한 확장형 완경사 파랑 방정식을 적용하고자하며 그 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla_{\mathfrak{n}}) + \left(\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma_{\mathfrak{N}}\right) \widehat{\mathfrak{n}} = 0$$
(2.2)

여기서, w = 마찰항 g = 쇄파파라메타 n=<u>1</u>(1+<u>2kd</u>) k(x, y) = 수심 d(x, y)에서 선형분산관계식 σ<sup>2</sup>= gktanh(kd)를 만족하는 파수 (=2π/L)를 가리킨다.

방정식의 마찰항을 나타내는 는 Dalrymple et al.(1984)에 의해 아래와 같 은 진폭 감쇠계수를 사용하여 나타낸다.

$$w = \left(\frac{2n\sigma}{k}\right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd)\sinh kd}\right]$$
(2.3)

#### $f_r = 마찰계수$

Collection @ kmou

레이놀즈수와 저면조도에 좌우하는 마찰계수는 Madsen(1976)과 Dalrymple et al.(1984)를 참조하였다. 일반적으로, 마찰계수  $f_r$ 의 크기는 Manning의 소산 계수 또는 조도계수 *n*과 비슷한 범위의 값을 가지며, 공간 (*x*, *y*)의 함수로서  $f_r$ 을 지정할 때 항내 진입에 따른 손실요소를 위해 항만입구에 더 큰 값을 부 여한다. 쇄파파라메타인 *x*에는 다음의 식을 사용한다(Dally et al., 1985; Demirbilek, 1994).

$$y = \frac{0.15}{d} \left( 1 - \frac{0.4^2 d^2}{4a^2} \right)$$
(2.4)

위의 관계식 이외에도 확장형 완경사 방정식은 비선형파의 시뮬레이션에 중 요하다고 알려진 진폭을 고려한 파랑분산관계를 사용할 수 있으며, 이는 식 (2.3)의 비선형 산란관계식으로 정리된다.

$$\sigma^{2} = gk [1 + (ka)^{2} F_{1} \tanh^{5} kd] \tanh \{kd + kaF_{2}\}$$
(2.5)

$$F_{1} = \frac{\cosh(4kd) - 2\tanh^{2}(kd)}{8\sinh^{4}(kd)}$$

$$F_{2} = \left(\frac{kd}{\sinh(kd)}\right)^{4}$$
(2.6)

#### 가) 경계조건

불투과성 직립구조물에 직교하는 유체의 흐름은 사실상 벽을 통과할 수 없으 므로  $\partial_{n}/\partial n=0$ 의 식을 따르지만, 해안선이나 투과성 구조물에 대해서는 다음 과 같은 부분반사경계조건이 적용 할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial n} = \mathbf{a} \,\mathbf{n} \tag{2.7}$$

a는 복소계수로 식 (2.8)과 같이 사용한다.

$$a = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r}$$
(2.8)  
여기서,  $K_r = 반사계수$ 

아래와 같이 제시된 Sommerfeld의 방사조건(Radiation condition)은 개방경계 를 따라 유출되는 파랑이 무한대로 전파되어 소멸하는 것을 가정하며 다음의 식이 적용된다.

$$\lim_{kr \to \infty} \sqrt{kr} \left( \frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \mathfrak{n}_{s} \to 0 \tag{2.9}$$

여기서, n<sub>s</sub> = 산란파의 포텐셜

Collection @ kmou

r = 중심축에서부터 임의의 점까지의 거리

∩<sub>s</sub>는 Mei(1983)에 의해 제시되었으며, 의도하는 산란파의 포텐셜 ∩<sub>s</sub>는 완
 경사방정식의 해이고, 식 (2.9)의 방사조건식을 만족한다. 이는 다음과 같이 나

타내어질 수 있다.

$$\eta_s = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(kr) \left( \alpha_n \cos n\Theta + \beta_n \sin n\Theta \right)$$
(2.10)

여기서,  $H_n(kr)$  = 제1종 Hankel함수를 나타낸다. 제2종 Hankel함수는 무한 대에서 Sommerfeld 방사조건을 만족하지 않으므로 식 (2.10)에서 제외되었다.

그러나  $\hat{n}_s$ 는 일정수심의 외부 영역을 필요로 하며, Fig. 3.1와 같은 항만 문 제에서도, 식 (2.10)에서 나타낸 산란파의 포텐셜은 개방경계와 관련된 단면  $A_1 및 A_2$ 에서 직선상의 완전반사 해안선을 필요로 한다. 이 문제를 극복하기 위하여, Xu et al.(1996)은 개방경계를 따라 포물선형근사를 포함한 개방경계조 건을 개발하였고, 아래의 식으로 제시된다.

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{n}}_s}{\partial r} + p \hat{\mathbf{n}}_s + q \frac{\partial \hat{\mathbf{n}}_s}{\partial \Theta^2} = 0$$

$$k^2 r^2 + k_0^2 r^2 + i k_0 r + \frac{1}{i}$$

(2.11)

 $\begin{array}{l} (q \ 7) \ k \ , \quad p = \frac{K \ r + K_0 r + K_0 r + 4}{2ik_0 r^2} \\ q = \frac{1}{2ik_0 r^2} \end{array}$ 

이때  $k_0$ 는 개방경계 Γ를 따라 평균수심에 상응하는 파수를 의미하며, 모델영 역 Ω내에서 확장형 완경사 방정식이 적용된다. 반원형 호 Γ를 따라서 개방경 계조건으로 위와 같이 포물선형 근사를 사용한다.



Fig. 2.10 Definition sketch of model domain



#### 나) 지배방정식의 유도

n의 해를 구할 시, 최고파압과 최고파속, 파랑의 진폭 그리고 파랑의 위상각은 n의 값으로부터 도출한다. 파랑표면의 미소 수립자의 속도 포텐셜은 다음과 같이 제시된다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \left[\Phi_1 \cos \omega t + \Phi_2 \sin \omega t\right] Z_{(Z)}$$
(2.12)

$$Z_{(Z)} = \frac{\cosh\left[k(z+h)\right]}{\cosh\left(kh\right)} \tag{2.13}$$

Î의 항에서의 포텐셜은 아래와 같다.  

$$\Phi = \frac{g}{i\omega}$$
 n (2.14)

식 (2.12)에서 위 식은 다음과 같이 다시 정리된다.

Collection @ kmou

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} K \left[ \hat{\eta}(x, y) e^{-i \left(\frac{\pi}{2} + \omega t\right)} \right]_{Z_{(Z)}}$$
(2.15)

$$\widehat{\mathfrak{n}} = \mathfrak{n}_1 + i\widehat{\mathfrak{n}_2} \tag{2.16}$$

위 식을 실수부와  $\widehat{n_1}$ , 허수부  $\widehat{n_2}$ 를 분리하고  $-\pi/2 - \omega t$ 를 a로 대체한다.

$$\Phi = \frac{g}{\omega} [\eta_1 \cos \alpha + \eta_2 \sin \alpha] Z$$
(2.17)

식(2.17)의 Φ에 대해 방향별 도함수 식을 평가하여 수립자의 속도에 관한 식을 구한다.

$$_{V_{X}} = \frac{g}{\omega} \left[ \left( \frac{\partial n_{1}}{\partial X} \right) \cos a + \left( \frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial X} \right) \sin a \right] Z$$
(2.18)

$$V_{y} = \frac{g}{\omega} \left[ \left( \frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial y} \right) \cos \alpha + \left( \frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial y} \right) \sin \alpha \right] Z$$
(2.19)

여기서, 속도의 수평성분을 포함하는 Z는 국지상수이다.

앞 식의  $v_x$ 와  $v_y$ 를 아래와 같이 대체하여 속도의 수평성분의 크기를 구할 수 있다.

$$|\psi|^{2} = (v_{x})^{2} + (v_{y})^{2}$$

$$|\psi|^{2} = \left(\frac{g}{\omega}\right)^{2} Z^{2} \left\{ \left[ \left(\frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial y}\right)^{2} \right] \cos^{2} \alpha + \left[ \left(\frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \widehat{n_{y}}}{\partial y}\right)^{2} \right] \sin^{2} \alpha - \left[ \frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n_{1}}}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n_{2}}}{\partial y} \right] \sin(2\alpha) \right\}$$

$$(2.20)$$

(2.21)

α에 대응하는 | μ<sup>2</sup>의 도함수가 0일 때 최고 수평속도는 나타나며 다음과 같 다.

$$\begin{cases} -\left[\left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{1}}}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{1}}}{\partial y}\right)^{2}\right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{2}}}{\partial x}\right)^{2} + \left(\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{2}}}{\partial y}\right)^{2}\right] \\ -2\left[\frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{1}}}{\partial x} - \frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{2}}}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{1}}}{\partial y} - \frac{\partial \widehat{\mathbf{n}_{2}}}{\partial y}\right] \cos(2\mathfrak{a}) = 0 \end{cases}$$

$$(2.22)$$

식 (2.22)을 이항하여 정리하면 식(2.23)과 같다.

$$a = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{2\left[\frac{\partial n_1}{\partial x} \frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial x} + \frac{\partial \widehat{n_1}}{\partial y} \frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial y}\right]}{-\left[\left(\frac{\partial \widehat{n_1}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n_1}}{\partial y}\right)^2\right] + \left[\left(\frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \widehat{n_2}}{\partial y}\right)^2\right]}\right]$$
(2.23)

속도의 수평성분의 값은 a에서 최대값 그리고 a+π/2에서 최소값을 가지게 되며 | 대의 값은 다음의 두각에 의해 계산된다.

그 중 큰 값은 전체 과정에서 가장 큰 속도가 되며, 압력은 베르누이식의 선 형식으로부터 얻어진다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = constant$$
(2.24)

운동 수두(속도에 의한 압력)은 이와 같은 선형식에서 무시하였다. 식 (2.15) 의 Φ의 식은 이 식에서 대체 되었고, 식들을 다시 풀면 식 (2.25)로 정리된다.

1945

$$P = -\rho g z + \rho g K (\eta e^{-i\omega t}) Z + C$$
(2.25)

상수 C는 Z=0일 때 0으로 하여 파의 주기에서 가장 큰 압력이 (îe<sup>-iwt</sup>)의 실수부가 *H*/2일 때 발생한다.

$$P_{\max} = -\rho gz + \rho g \frac{H}{2} Z \tag{2.26}$$

파랑의 위상각 β는 다음의 식에서 구해진다.

$$\beta = \arctan \frac{n_2}{n_1} \tag{2.27}$$

이 때 cosβ는 -1에서 1까지 변화하고, 진폭A는 다음 식으로 구한다.

$$A = \sqrt{\widehat{\mathfrak{n}_1} + \widehat{\mathfrak{n}_2}} \tag{2.28}$$

시간 0에서 순간 해수면 높이는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\mathbf{n} = K[\mathbf{n}e^{-i\omega t}] = [\widehat{\mathbf{n}_1}\cos\omega t + \widehat{\mathbf{n}_2}\sin\omega t]$$
(2.29)

본 연구는 기본방정식을 해석하기 위한 수치해석방법으로 복잡한 해안지역에 서의 모델링에 적합한 확장형 완경사 방정식을 이용한다.

개방해역(일정수심)에서의 산란파 중, 그 입사파는 다음과 같이 정의된다.

$$\widehat{\mathfrak{n}}_{I} = A e^{ikr\cos(\Theta - \Theta_{I})} = A \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_{n} i^{n} J_{n}(kr) \cos n(\Theta - \Theta_{I})$$
(2.30)

여기서, A=진폭 θ<sub>I</sub>= x축과 이루는 입사파향 J<sub>n</sub> = 제1종 n차 Bessel함수

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & \text{when } n = 0 \\ 2 & \text{when } n \neq 0 \end{cases}$$
(2.31)

입사파는 x축의 양의 방향을 따라 이동은 입사파향의 θ<sub>1</sub>가 0일 때 이며, Ω 영역을 유한요소망에 의한 수치모델영역, Ω<sub>0</sub>는 무한대로 방사하는 외부영역으 로 정의한다. 영역 Γ 내부에 복잡한 지형과 구조물 및 섬들이 존재한다고 하면, Ω<sub>0</sub>에서 입사파와 산란파의 합인 총파랑은 식 (2.32)과 같이 정의한다.

$$n_{est} = \hat{n}_{I} + \hat{n}_{S}$$
(2.32)  
식 (2.2)는 일반형으로 다음과 같이 쓸 수 있다.  
 $\nabla \cdot (a \nabla \hat{n}) + b \hat{n} = 0$ (2.33)  
여기서  $a \equiv CC_{g}$   
 $b \equiv \frac{C_{g}}{C} \sigma^{2} + i_{0} w + iC_{g} \sigma_{X}$ 

Mei(1994)는 해안선과 구조물에서 식 (2.3)과 무한 영역에서의 식 (2.4)에 의 한 경계조건으로 식 (2.33)를 푸는 문제는 다음의 범함수 F가 일정하다는 것을 나타낸 바 있다.

$$F = \int \int_{\Omega} \frac{1}{2} [\tilde{a} (\nabla \hat{n})^2 - \tilde{b}\Phi^2] dA - \int_{B} \frac{1}{2} a \tilde{a} \hat{n}^2 ds + \int_{\Gamma} a \left[ \left( \frac{1}{2} \hat{n}_{S+} n_{I} \right) \frac{\partial \hat{n}_{S}}{\partial n} - \hat{n} \frac{\partial (\hat{n}_{S+} + \hat{n}_{I})}{\partial n} \right] ds$$

$$(2.34)$$

범함수 F는 최소화하여 Ω 영역에서 파랑 포텐셜의 해를 찾을 수 있으며, 방 정식의 선형행렬식으로 개방해역에서의 완경사 방정식의 복합요소식이 된다. 경계조건에서 해안 경계와 원형 개방경계를 통합하여 반복법(Iterative method) 으로 연립방정식을 풀어 파랑장을 구할 수 있으며, 이에 대한 상세한 유도와 해석기법은 Lee(1989)를 참조하였다.





#### 2.2 Boussinesq 방정식 모델

비선형을 고려한 파랑장의 계산은 파력·파의 쳐올림 현상이나 파와 구조물 의 간섭문제 등을 고려하는데 중요하며, Boussinesq 방정식을 이용한 평면파 랑장에서의 계산법은 유체운동의 기초식인 연속식과 운동방정식을 연직방향 으로 적분한 식을 그대로 이용하기 때문에 파의 비선형성 때문에 일어나는 모든 현상을 동시에 해석 할 수 있다. Nwogu(1993)는 파고가 수심에 비하여 충분히 작은 경우에 적용할 수 있는 약비선형 Boussinesq 방정식을 유도하였 으며 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음과 같다.

NE MODAN.

$$+\nabla = 0 \tag{2.35}$$

$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{t}} + g \nabla \eta + \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha}} \cdot \nabla) \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha}} + z_{\alpha} [\nabla (\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{t}} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{t}}) \nabla h]$$
(2.36)  
+ 
$$\frac{1}{2} (z_{\alpha} + h)^{2} - h^{2} ] \nabla (\nabla \cdot \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{t}}) = 0$$

여기서 η, u, h 및 g는 각각 수면변위, 수평유속, 수심 및 중력가속도이며, z<sub>α</sub>는 정수면으로부터 유속 (u<sub>α</sub>)이 정의되는 깊이, ∇ = ∂ ∂ ∂ ∂x<sup>'</sup>, ∂y</sub>)는 수평기울기 연산자, x와 y는 공간좌표, t는 시간, 첨자 가운데는 시간에 대한 편미분을 의미한다.

연속방정식의 유량  $u_f$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\boldsymbol{u_{f}} = \int_{-h}^{\eta} \boldsymbol{u} dz = h + \eta \boldsymbol{u_{\alpha}}$$

$$+ h \left( z_{\alpha} + \frac{h}{2} \right) \left[ \nabla \left( \boldsymbol{u_{\alpha}} \cdot \nabla h \right) + \left( \nabla \cdot \boldsymbol{u_{\alpha}} \right) \nabla h \right]$$

$$+ h \left[ \frac{\left( z_{\alpha} + h \right)^{2}}{2} - \frac{h^{2}}{6} \right] \nabla \left( \nabla \cdot \boldsymbol{u_{\alpha}} \right)$$
(2.37)

- 21 -

한편, 수심이 얕아져서 수심과 파고의 크기가 같은 정도일 경우 파랑은 강비선형이 되며 이에 대한 운동량 방정식과 유량식은 다음과 같다(Nwogu, 1996).

$$\begin{aligned} & , \mathbf{t} \quad g \nabla \eta + \mathbf{u}_{\eta} \cdot \nabla ) \mathbf{u}_{\eta} + w \nabla w_{\eta} \\ & + (z_{\alpha} - \eta) \big[ \nabla (\mathbf{u}_{\alpha, t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha, t}) \nabla h \big] \\ & + \frac{1}{2} \left( z_{\alpha} + h \right)^{2} - h + \eta \right)^{2} \big] \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha, t}) \\ & - \left[ (\mathbf{u}_{\alpha, t} \cdot h) + (h + \eta) \nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha, t} \right] \nabla \eta \\ & + \left[ \nabla (\mathbf{u}_{\alpha, t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha, t}) \nabla h + (z_{\alpha} + h) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha}) \right] z_{\alpha, t} \\ & = 0 \end{aligned}$$

$$(2.38)$$

$$\boldsymbol{u_{f}} = (h+\eta) \left\{ \boldsymbol{u_{\alpha}} + \left\lfloor (z_{\alpha}+h) - \frac{h+\eta}{2} \right\rfloor \left[ \nabla (\boldsymbol{u_{\alpha}} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot \boldsymbol{u_{\alpha}}) \nabla h \right] \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{c} + \left\lfloor (z_{\alpha}+h)^{2} - (h+\eta)^{2} \\ 2 & 6 \end{array} \right] \nabla (\nabla \cdot \boldsymbol{u_{\alpha}}) \end{array} \right\}$$
(2.39)

여기서 첨자 η는 수표면에서의 값을 의미하며 w는 물입자의 연직속도를 나 타낸다. 그리고 강비선형 Boussinesq 방정식을 사용하는 경우 z<sub>α</sub>는 다음 식 으로부터 계산된다.

$$z_{\alpha} + h = 0.465(h + \eta) \tag{2.40}$$

#### 가) 선형분산관계식

Collection @ kmou

Boussinesq 방정식에 대한 분산관계식은 유속이 정의되는 수심에 따라 변화하며 다음과 같다(Nwogu, 1993).

$${}^{2}_{gh} = \frac{L^{2}}{T^{2}} \begin{bmatrix} 1 - (\alpha + 1/3)(kh)^{2} \\ 1 - \alpha(kh)^{2} \end{bmatrix}$$
(2.41)

여기서 , L 및 T는 각각 파랑의 위상전파속도, 파장 및 주기이며, 는 파 수  $= 2\pi/L$ )이고,  $\alpha = z + h$ )<sup>2</sup>/ $h^2 - 1$ ]/2 이며,  $\alpha$ 의 최적값은 -0.392로 이는  $z_{\alpha} = -0.535h$ 에 해당된다.

#### 나) 약비선형 상호작용에 의한 에너지 전달

바다의 파랑은 주파수와 파향에 대한 여러 성분파의 중첩으로 표현되며, 자 유수면 경계조건의 비선형성은 성분파간의 상호작용을 일으켜서 성분파간 에 너지의 교환이 이루어진다.

파랑성분간의 비선형 에너지 교환은 해수면이 바람으로부터 에너지를 얻어 파랑이 발달하는 과정을 잘 설명하고 있으며 심해에서는 4파 상호작용이 지 배적인 것으로 알려져 있다(Hasselmann, 1962). 천해에서는 4파 상호작용에 관계되는 공명조건이 파랑의 진행과 함께 변화하므로 4파 상호작용은 우세하 지 못하며 3파 상호작용이 우세해진다.

2개 성분파의 진폭을  $a_1$ ,  $a_2$ , 각주파수를  $w_1$ ,  $w_2$ , 파수를 ,  $k_2$ , 그리고 파향 을  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 라고 하면 수면 변위는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta^{(1)}(\boldsymbol{x},t) = a_1 \cos(\boldsymbol{k}_1 \cdot \boldsymbol{x} - w_1 t) + a_2 \cos(\boldsymbol{k}_2 \cdot \boldsymbol{x} - w_2 t)$$
(2.42)

여기서 **k**=(kcosθ, ksinθ)이며 η<sup>(1)</sup>은 상호작용 전의 1차항을 의미하고, 두 개 의 파랑이 상호작용하여 나타나는 2차항은 다음과 같다.

<sup>2)</sup> ,t)= 
$$\frac{a_1^2}{2} + w_1, w_2, \theta_1, \theta_2 \right) \cos(2\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - 2w_1 t)$$
 (2.43)  
  $+ \frac{a_1^2}{2} G + (w_1, w_2, \theta_1, \theta_2) \cos(2\mathbf{k_2} \cdot \mathbf{x} - 2w_2 t)$   
  $+ a_1 a_2 G \pm (w_1, w_2, \theta_1, \theta_2) \cos(2\mathbf{k_{\pm}} \cdot \mathbf{x} - 2w_{\pm} t)$ 

여기서  $k_{\pm} = k_1 + k_2$ 이며 3파 상호작용의 결과로서 고주파인 Superharmonic 성분  $(w_+ = w_1 + w_2)$ 과 저주파 subharmonic 성분  $(w_- = w_1 - w_2)$ 이 추가적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

한편 2차 비선형 상호작용계수  $G_{\pm}(w_1, w_2, \theta_1, \theta_2)$ 는 다음과 같다.

$$G_{\pm}(w_{1},w_{2},\theta_{1},\theta_{2}) = \frac{w_{1}w_{2}(k_{\pm}h)^{2}\cos\Delta\theta \ 1 - (\alpha + 1/3)(k_{\pm}h)^{2}]}{2\lambda k_{1}'k_{2}'h^{3}}$$

$$+ \frac{w_{\pm}\left[1 - \alpha(k_{\pm}h)^{2}\right]\left[w_{1}k_{1}'h(k_{1}h \pm k_{2}h\cos\Delta\theta) + w_{2}k_{1}'h(k_{1}h\cos\Delta\theta \pm k_{2}h)\right]}{2\lambda k_{1}'k_{2}'h^{3}}$$

$$(2.44)$$

$$+ \frac{1945}{4945}$$

AND ACCOUNT

여기서  $k_{\pm}, k', \lambda$ 는 각각 다음과 같이  $k_{\pm} = \left|k_1 \pm k_2\right|, k' = k \ 1 - (\alpha + 1/3)(kh)^2\right|,$  $\lambda = w_{\pm}^2 \left[1 - \alpha (k_{\pm}h)^2\right] - gk_{\pm}^2 h \left[1 - (\alpha + 1/3)(k_{\pm}h)^2\right]$ 이며,  $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2$ 이다.

성분파랑간의 비선형 상호작용이 공학적으로 중요한 의미를 갖는 것은 이것이 저주파 성분 즉 장주기 성분을 발생시키기 때문으로 비록 비선형 상호작용에 의 하여 발생된 장주기 성분이 에너지가 작다고 하더라도 장주기 특성상 항내로 용 이하게 진입할 수 있기 때문에 이 주기가 항만의 고유주기에 근접할 경우 항내 수면에는 큰 요란이 발생할 수 있다.

#### 다) 쇄파

🗗 Collection @ kmou

쇄파는 강한 비선형 현상으로 주변에 강한 회전성 난류흐름을 발생시키며 모
델화하기가 매우 어렵기 때문에 기존의 수치모델에서는 고립파의 이론적 한계파 형경사 또는 경험적인 수심 의존적인 쇄파공식을 적용하였다.

Bouss-2D에서는 다음과 같은 가정 아래 1-방정식 난류에너지 모델으로 쇄파 를 모의하였다.

- 쇄파의 형식은 붕파로 간주한다.

Collection @ kmou

 자유수면에서의 수평유속이 파의 위상속도를 초과하면 수표면에서 난류가 발 생한다,

 - 난류운동에너지의 생성률은 자유수면에서의 수평유속의 연직방향 기울기에 비 례한다,

- 쇄파난류는 자유수면에서의 수평유속으로 수표면 근방에서 이송한다.

Bouss-2D에서 쇄파에 의한 에너지 소산은 운동량방정식의 우변에 다음과 같 은 원천항을 추가하여 반영된다.

$$reaking = -\frac{1}{h+\eta} \nabla \nu_t h+\eta \nabla \cdot u_a ]$$
(2.45)

여기서  $\nu_t$ 는 난류와점성게수로서 쇄파에 의한 난류운동에너지를  $k_e$ , 난류의 길 이규모를  $l_t$ 라고 하면 다음과 같이 기술할 수 있다.

 $\nu_t = k_e l_t \tag{2.46}$ 

한편 난류운동에너지의 생성, 이송, 확산 및 소산을 평가하는 1-방정식은 다음 과 같다.

$$\frac{\partial k}{t} = - \cdot \nabla k_e + \sigma \nabla \cdot \nabla \nu_t k_e \right)$$

$$+ \frac{l_t^2}{C} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} \right]^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \left]_{z=\eta}^{1.5} - C_D \frac{k_e^{1.5}}{l_t}$$
(2.47)

여기서 *B*는 난류운동에너지의 생성을 나타내는 변수로서 쇄파가 발생하면 1, 그렇지 않으면 0의 값으로 *C*를 위상속도라고 하면 다음과 같다.

$$B = \begin{array}{c} 0 & |\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\eta}}| < C \\ 1 & |\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\eta}}| \ge C \end{array}$$
(2.48)

한편 Bouss-2D에서 위상속도 *Ct*)=-η/|∇η|로부터 구하며, *C*<sub>D</sub>와 σ는 경험 상수로서 각각 0.02와 0.2를 사용하며 난류의 길이규모로는 유의파고를 사용한다.

#### 라) 저면마찰

파랑의 의한 유동에서 바닥경계층은 하천흐름이나 조석류와는 달리 저면의 작 은 영역에 국한되므로 통상적으로 저면마찰은 파랑에너지의 감쇠에 큰 영향을 주지는 않으나 수심이 얕은 쇄파대내나 해안선 부근에서는 저면마찰도 파고감쇠 의 중요한 원인이 된다. 저면의 난류경계층에 의한 에너지 소산은 운동량방정식 의 우변에 다음과 같은 원천항을 추가하여 고려한다.

$$F_{friction} = -\frac{1}{h+\eta} f_w \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha}} |\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\alpha}}|$$
(2.49)

여기서  $f_w$ 는 파랑에 의한 저면마찰계수로서 개수로나 조석수로에서 사용되는 Chezy 상수  $(C_f)$ 를 사용하는 경우에는  $f_w = g/C_f^2$ 이 된다.

#### 마) 감쇠층

계산영역의 부분반사 경계면과 계산영역 밖으로 나가는 파랑에 대한 감쇠층 (Damping layer)에서의 수면변위와 유속 및 감쇠계수는 다음 식으로 주어진다.

$$-\mu x)\eta \tag{2.50}$$

$$F_u = -\mu(x)u_\alpha \tag{2.51}$$

$$\mu_{nd}(x) = \frac{T}{30}\mu(x) \tag{2.52}$$

여기서, μ(x)는 감쇠계수, μ<sub>nd</sub>(x)는 무차원 감쇠계수로 0~1의 값을 갖는다. 부 분반사 경계는 감쇠층 두께와 무차원 감쇠계수를 조정하여 반사율을 고려할 수 있다.

#### 바) 다공 구조물

Bouss-2D는 투과성의 다공영역 (Porous region)을 설정하여 투과성 구조물에 의한 부분반사와 전달을 모의할 수 있도록 하였다. 투과영역의 공극률을 *n*이라 고 하면 다공영역에서 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같이 변형된다.

1945

$$\eta_t + \nabla \cdot \left|_n\right) = 0 \tag{2.53}$$

$$\boldsymbol{u_{\alpha,t}} + ng \cdot \nabla \left( \frac{\boldsymbol{u_{\alpha}}}{n} \right) + z_{\alpha} \nabla \left( \boldsymbol{u_{\alpha,t}} \cdot \nabla h \right) + \left( \nabla \cdot \boldsymbol{u_{\alpha,t}} \right) \nabla h ]$$

$$+ \frac{1}{2} \left( z_{\alpha} + h \right)^{2} - h^{2} \right] \nabla \left( \nabla \cdot \boldsymbol{u_{\alpha,t}} \right) + nf_{1}\boldsymbol{u_{\alpha}} + nf_{2}\boldsymbol{u_{\alpha}} \left| \boldsymbol{u_{\alpha}} \right| = 0$$

$$(2.54)$$

여기서  $f_1$ 과  $f_2$ 는 각각 층류 및 난류 마찰계수로서 다음과 같은 경험식으로

표현된다.

$$= \alpha_0 \frac{1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{d^2}$$
(2.55)

$$f_2 = \beta_0 \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{d}$$
(2.56)

여기서 ν는 물의 동점성계수이며 d는 다공영역을 구성하는 입자의 크기이고, α<sub>0</sub>와 β<sub>0</sub>는 경험상수로서 각각 780 ~ 1500 및 1.5 ~ 3.6의 값을 갖는다.





# 2.3 수치모델의 적용성 검토

### 2.3.1 확장형 완경사 방정식 해석모델의 적용성 검토

확장형 완경사 방정식 해석모델의 적용성을 검토하기 위하여 다방향 조파수조 내에 직립구조물을 설치하여 직립구조물에 따른 연파의 발생을 수치모델을 통 해 모의하고 이를 Lee and Yoon(2006)의 수리 및 수치모델실험에 근거한 계산 결과와 비교·검증하였다. Lee and Yoon은 직립구조물을 따른 규칙파의 연파특 성을 확인하기 위해 평면수조를 이용한 수리실험과 포물형 근사식을 이용한 수 치모델실험을 진행하였으며, 수리모형실험의 조건은 다음과 같다(Table, 2.1).

가로 36m, 세로 42m의 직사각형 다방향 조파수조 내에 길이 20m의 직립구조 물을 설치하였으며, 유한한 수조 내에서 실험이 진행되어 구조물에 의한 반사파 를 충분히 저감시키지 못했을 경우 발생할 실험결과의 신뢰도 저하를 고려하여 조파기 반대편의 수조벽에 1:12 경사의 쇄석의 배치 및 조파기 후면 스테인리스 재질의 소파시설을 설치하여 반사파를 제어하였다(Fig. 2.2).

실험에서 사용된 직립구조물 모형의 제원은 폭( ) 및 높이( +h) 0.6m, 길이 20m이다. 실험에 적용된 수심(h)은 0.45m로 정수면(still water level)으로부터 구조물 상단까지의 여유고(h<sub>c</sub>)는 0.15m이다. 수리실험 시 파랑에 의해 직립구조 물 모형이 충분히 지지될 수 있도록 모형 내부에 쇄석을 채워 중량을 확보하였으며 구조물 높이 0.6m와 수심 0.45m는 연파에 의해 월파가 발생하지 않는 조건 이다(Fig. 2.3).

실험에 적용된 입사파의 제원은 주기(T) 0.9sec, 파고( $H_0$ ) 0.030m를 적용하였 으며, 수심 0.45m 조건에서 입사파의 주기가 0.9sec인 경우, 선형분산관계식으로 부터 계산된 파장  $\lambda$ 는 1.238m로  $H_0$ =0.030m인 조건에서 파향경사( $kA_0$ )는 0.0762, 상대진폭( $\epsilon = A_0/h$ )은 0.0333이다. 여기서, k는 입사파랑의 파수,  $A_0$ 는 입사파랑 의 진폭이다.

실험에서 적용된 입사파 조건은 실험 시 쇄파가 발생하지 않는 조건이며, 직립 구조물과 입사파랑이 이루는 각()은 10°, 19°, 28°이다.

직립구조물과 입사파랑에 의해 발생하는 연파는 직립구조물의 길이에 따른 방 향과 직립구조물의 법선방향에 대하여 계측을 진행하였으며, 직립구조물을 따른 파고는 제체전면에서 0.05m 떨어진 위치에서 계측하였다.



Fig. 2.2 Experimental setup for analysis of regular wave(Lee & Yoon, 2006)



Fig. 2.3 Sectional view of experimental structure(Lee & Yoon, 2006)

1945

Table 2.1 Hydraulic model experiment conditions under regular wave

Wave Conditio	Structure Condition		
Period, (sec)	0.9	Width, $W(m)$	0.6
Height, $H$ (m)	0.03	Length, (m)	20
Incident angle (°)	10°, 19°, 28°	Free board (m)	0.15
Water depth, $h$ (m)	0.45	<ul> <li>Non-breaking wave</li> <li>Non-wave overtopping</li> </ul>	
Relative amplitude, $A \ / h$	0.0333		
Relative depth, $kh$	2.284	• Uni-direction	
Wave stiffness, $kA_0$	0.0762	· Regular wave	

직립구조물에 따른 연파의 해석을 위한 확장형 완경사방정식 해석모델의 적용 성 검토를 위해 전술한 Lee and Yoon(2006)의 수리 및 수치모델실험에 근거한

계산 결과와 확장형 완경사방정식 해석모델의 결과를 비교·검증하였으며, 수치 모델실험의 조건은 다음과 같다.(Table 2.3)

전체 계산영역은 조파를 위한 Semi-Circle 영역을 포함한 가로 36000m, 세로 42000m, 일정수심() 45m의 직사각형 수조 형태이며, 격자 간격은 15m로 총 85319개의 격자로 구성되어 있다(Fig. 2.4).

실험에서 사용된 직립구조물 모형의 제원은 폭( ) 60m, 길이 2000m으로 반 사율의 적용은 항만설계 기준 및 Goda 이론에 입각하여 직립구조물 0.95, T.T.P. 및 사석 0.5, 자연해빈 0.2, 돌핀부두 0.1으로 적용하였다(Table 2.2).

Tabla	~ ~	Deflection				
Iable	2.2	Reflection	coefficient	according	το	target

Formation	Reflection coefficient			
Wall(crest on SWL)	$0.7 \sim 1.0$			
Wall(crest under SWL)	$0.5 \sim 0.7$			
Rubble(1:2 $\sim$ 3 slope)	$0.3 \sim 0.6$			
Heteromorphy block	$0.3 \sim 0.5$			
Natural coastal	$0.05 \sim 0.2$			

1945

실험에 적용된 입사파 제원은 주기(T) 9sec, 파고(H) 3m를 적용하였으며, 수 심 45m 조건에서 입사파의 주기가 9sec인 경우, 선형분산관계식으로부터 계산된 파장 λ는 123.87m로 H<sub>0</sub>=3m인 조건에서 파형경사(kA<sub>0</sub>)는 0.0762, 상대진폭 (ε=A<sub>0</sub>/h)은 0.0333으로 Lee and Yoon(2006)의 입사파랑과 동일한 특성을 갖는 다. 이외에도 파랑의 변형을 해석하기위한 쇄파계수(wave breaking parameter) 와 해저마찰계수(friction parameter)를 적용하였다.

실험에서 직립구조물과 입사파랑이 이루는 각(β)은 10°, 19°, 28° 이며, 직립구 조물과 입사파랑에 의해 발생하는 연파의 특성은 직립구조물의 길이에 따른 방 향과 직립구조물의 법선방향에 대한 파고의 분포의 추출을 통해 검토하였다.



Fig. 2.4 Numerical mesh of CG-WAVE for examination of applicability

Table	2.3	Numerical	model	experiment	conditions	under	regular	wave

CG-WAVE Model C	Structure Condition		
Target range (m)	3600 by 4200	Width, (m)	60
Element space (m)	15	Length, (m)	2000
Number of elements	85319	Free board (m) 1	
Period, $T$ (sec)	9	Wave breaking para.	0.15
Height, $H$ (m)	3	Friction para.	0.12
Incident angle (°)	10°, 19°, 28°		
Water depth, $h$ (m)	45	• Uni-direction	
Relative amplitude, $A/h$	0.0333	· Regular wave     · Non-linear dispersion	
Relative depth, kh	2.284		
Wave stiffness, $kA_0$	0.0762		



Fig. 2.6 Wave height distribution of CG-WAVE,  $\beta = 28°$  (Unit : m)

- 34 -



Fig. 2.8 Wave height distribution of CG-WAVE(detail),  $\beta = 28^{\circ}$  (Unit : m)

- 35 -

Figs. 2.5~2.6은 확장형 완경사 방정식 해석모델을 바탕으로 직립 구조물에 전 술한 조건의 규칙파랑이 입사했을 경우의 파고분포를 입사각도()에 따라 분류 한 것이며, Figs. 2.7~2.8는 파고분포를 직립구조물 전면에 대한 상세도로 표현 한 것이다. 입사파랑의 입사각도(β)가 증가할수록 반사파의 영향이 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 Perroud(1957) 및 Weigel(1964)의 연구에 의해 제 안된 연파의 발생메커니즘(Fig. 1.2)에 부합한다고 사료된다. 또한 입사각도(β)의 증가에 따른 연파의 파고( <sub>t</sub>) 상승 및 연파의 폭(B) 감소, 입사파랑의 전파방향 에 따른 연파의 파고와 연파의 폭의 상승이라는 연파의 수리적 특성에 대해서도 부합하는 결과를 나타낸다.

이와 같은 확장형 완경사방정식 해석모델의 결과를 Lee and Yoon(2006)의 수 리 및 수치모델실험의 결과에 대해 비교·검증을 진행하였다.

직립구조물에 대한 입사파랑의 입사각도(β) 10°, 19°, 28°에 대하여 직립구조물 의 길이방향에 따른 상대파고의 분포와 직립구조물의 법선방향에 따른 상대파고 의 분포를 Figs. 2.9~2.14를 통해 나타내었으며, 모든 입사각도(β)에 대하여 해 석모델의 결과와 Lee and Yoon(2006)의 수리 및 수치모델실험의 결과의 분포가 비슷한 추세를 띄고 있다.

또한 모든 입사각도(β) 대하여 상대파고(*H*/*H*<sub>0</sub>)의 값이 구조물 선단부분에서 지수함수적으로 증가하며 일정한 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

이를 통해 확장형 완경사방정식 해석모델이 세장형 복합방파제로부터 발생하 는 연파의 특성을 확인하기 위한 수치모델실험에 적합한 해석모델이라고 사료된 다.

- 36 -



Fig. 2.10 Comparison of normalized wave heights perpendicular to the breakwater(y) from regular wave models,  $\beta = 10^{\circ}$ 



Fig. 2.12 Comparison of normalized wave heights perpendicular to the breakwater(y) from regular wave models,  $\beta = 19^{\circ}$ 



Fig. 2.14 Comparison of normalized wave heights perpendicular to the breakwater(y) from regular wave models,  $\beta = 28^{\circ}$ 

#### 2.3.2 Boussinesq 방정식 해석모델의 적용성 검토

Boussinesq 방정식 해석모델의 적용성을 검토하기 위하여 다방향 조파수조 내 에 직립구조물을 설치하여 직립구조물에 따른 연파의 발생을 수치모델을 통해 모의하고 이를 Lee and Yoon(2008)의 수리 및 수치모델실험에 근거한 계산 결 과와 비교·검증하였다. Lee and Yoon은 직립구조물을 따른 불규칙파의 연파특 성을 확인하기 위해 평면수조를 이용한 수리실험과 REF/DIF S 모델을 통한 수 치모델실험을 진행하였으며, 수리모형실험의 조건은 다음과 같다(Table. 2.4).

가로 36m, 세로 42m의 직사각형 다방향 조파수조 내에 길이 20m의 직립구조 물을 설치하였으며, 유한한 수조 내에서 실험이 진행되어 구조물에 의한 반사파 를 충분히 저감시키지 못했을 경우 발생할 실험결과의 신뢰도 저하를 고려하여 조파기 반대편의 수조벽에 1:12 경사의 쇄석의 배치 및 조파기 후면 스테인리스 재질의 소파시설을 설치하여 반사파를 제어하였다. 또한 수조의 측면도 마찬가 지로 스테인리스 재질의 소파시설 및 쇄석을 설치하여 좌우측면의 벽면에 의한 반사파를 제어하였다(Fig. 2.15).

실험에서 사용된 직립구조물 모형의 제원은 폭( ) 및 높이(+h) 0.6m, 길이 20m이다. 실험에 적용된 수심(h)은 0.45m로 정수면(sea water level)으로부터 구 조물 상단까지의 여유고(h<sub>c</sub>)는 0.15m이다. 수리실험 시 파랑에 의해 직립구조물 모형이 충분히 지지될 수 있도록 모형 내부에 쇄석을 채워 중량을 확보하였으며 구조물 높이 0.6m와 수심 0.45m는 연파에 의해 월파가 발생하지 않는 조건이다 (Fig. 2.16).

실험에 적용된 입사파의 제원은 주기(T) 0.9sec, 유의파고( $H_{s0}$ ) 0.030m를 적용 하였으며, 수심 0.45m 조건에서 입사파의 주기가 0.9sec인 경우, 선형분산관계식 으로부터 계산된 유의파장  $L_s$ 는 1.238m로  $H_0$ =0.030m인 조건에서 파향경사 ( $k_sH_{s0}$ )는 0.1522, 상대유의파고( $\epsilon_s = H_{s0}/h$ )은 0.0667이다. 여기서,  $k_s$ 는 입사파랑



의 유의파수, 0는 입사파랑의 유의파고이다.

실험에서 적용된 입사파 조건은 실험 시 쇄파가 발생하지 않는 조건이며, 직립 구조물과 입사파랑이 이루는 각()은 10°, 19°, 28°이다.

직립구조물과 입사파랑에 의해 발생하는 연파는 직립구조물의 길이에 따른 방 향과 직립구조물의 법선방향에 대하여 계측을 진행하였으며, 직립구조물을 따른 파고는 제체전면에서 0.05m 떨어진 위치에서 계측하였다.



Fig. 2.15 Experimental setup for analysis of irregular wave(Lee & Yoon, 2008)





Fig. 2.16 Sectional view of experimental structure(Lee & Yoon, 2008)

1945

	Table 2.4	4 H <sup>,</sup>	vdraulic	model	experiment	conditions	under	irregular	wave
--	-----------	------------------	----------	-------	------------	------------	-------	-----------	------

Wave Conditio	Structure Con	dition	
Period, (sec)	0.9	Width, $W(m)$	0.6
Significant height, ${H}_0$ (m)	0.03	Length, (m)	20
Incident angle (°)	10°, 19°, 28°	Free board (m) 0.1	
Water depth, $h$ (m)	0.45	<ul> <li>Non-breaking wave</li> <li>Non-wave overtopping</li> </ul>	
Relative sig. height, $H_{\!s0}/h$	0.0667		
Relative depth, kh	2.284	• Uni-direction	
Wave stiffness, $k_s H_{s0}$	0.1522	· Irregular wave	

직립구조물에 따른 연파의 해석을 위한 Boussinesq 방정식 해석모델의 적용성 검토를 위해 전술한 Lee and Yoon(2008)의 수리 및 수치모델실험에 근거한 계

산 결과와 Boussinesq 방정식 해석모델의 결과를 비교·검증하였으며, 수치모델 실험의 조건은 다음과 같다(Table 2.5).

전체 계산영역은 가로 36000m, 세로 42000m, 일정수심() 45m의 직사각형 수 조 형태이며, 격자의 크기는 가로 10m, 세로 10m로 총 151200개의 격자로 구성 되어 있으며, 외부경계에서는 반사파의 억제를 위한 폭 100m의 damping layer 를 적용하였다(Fig. 2.17).

실험에서 사용된 직립구조물 모형의 제원은 폭( ) 60m, 길이 2000m이며, 직 립구조물의 경계에서 폭 5m의 damping layer를 적용함으로써 직립구조물에서의 파랑에너지 소산을 해석하였다.

실험에 적용된 입사파 제원은 주기(T) 9sec, 유의파고(H) 3m를 적용하였으 며, 수심 45m 조건에서 입사파의 주기가 9sec인 경우, 선형분산관계식으로부터 계산된 유의파장 L<sub>s</sub>는 123.87m로 H<sub>0</sub>=3m인 조건에서 파형경사(k<sub>s</sub>H<sub>s0</sub>)는 0.1522, 상대유의파고(ϵ<sub>s</sub> = H<sub>s0</sub>/h)은 0.0667으로 Lee and Yoon(2008)의 입사파랑과 동일 한 특성을 갖는다. 계산 시간간격(time step)은 0.2sec를 적용하였고, 표준 JONSWAP 스펙트럼 및 주파수 스펙트럼 첨두증폭계수(Peak enhancement parameter) γ는 3.3의 값을 적용하였으며, 서브 그리드의 난류 표현을 위한 에디 점성계수 값인 Smagorinsky number 및 파랑에너지의 방향분포계수(directional spreading function) σ<sub>θ</sub> 를 적용하였다.

실험에서 직립구조물과 입사파랑이 이루는 각(β)은 10°, 19°, 28° 이며, 직립구 조물과 입사파랑에 의해 발생하는 연파의 특성은 직립구조물의 길이에 따른 방 향과 직립구조물의 법선방향에 대한 파고의 분포의 추출을 통해 검토하였다.



Fig. 2.17 Numerical mesh of BOUSS-2D for examination of applicability

CG-WAVE Model Condition		Structure Condition	
Target range (m)	3600 by 4200	Width, (m)	60
Element size (m)	10 by 10	Length, (m)	2000
Number of elements	151200	Free board (m) 15	
Period, $T$ (sec)	9	Spectrum JONS	
Height, $H$ (m)	3	Smagorinsky Num. 0.0	
Incident angle (°)	10°, 19°, 28°	Shape parameter, $\gamma$ 3.3	
Water depth, $h$ (m)	45	Dir. dispersion angle $10^{\circ} \sim 3$	
Relative amplitude, $H_0/h$	0.0667	· Non-wave run up	
Relative depth, kh	2.284	Uni-direction	
Wave stiffness, $k_s H_{s0}$	0.1522	<ul> <li>Irregular wave</li> <li>Linear dispersion</li> </ul>	

Table 2.5 Numerical model experiment conditions under irregular wave





Fig. 2.19 Wave height distribution of BOUSS-2D,  $\beta = 28°$  (Unit : m)

- 45 -



Fig. 2.21 Wave height distribution of BOUSS-2D(detail),  $\beta = 28^{\circ}$  (Unit : m)

- 46 -

Figs. 2.18~2.19는 Boussinesq 방정식 해석모델을 바탕으로 직립 구조물에 전 술한 조건의 불규칙파랑이 입사했을 경우의 파고분포를 입사각도()에 따라 분 류한 것이며, Figs. 2.20~2.21는 파고분포를 직립구조물 전면에 대한 상세도로 표현한 것이다. 입사파랑의 입사각도(β)가 증가할수록 반사파의 영향이 뚜렷해지 는 것을 확인할 수 있으며, 이는 Perroud(1957) 및 Weigel(1964)의 연구에 의해 제안된 연파의 발생메커니즘(Fig. 1.2)에 부합한다고 사료된다. 또한 입사각도(β) 의 증가에 따른 연파의 파고( t) 상승 및 연파의 폭(B) 감소, 입사파랑의 전파 방향에 따른 연파의 파고와 연파의 폭의 상승이라는 연파의 수리적 특성에 대해 서도 부합하는 결과를 나타낸다.

이와 같은 Boussinesq 방정식 해석모델의 결과를 Lee and Yoon(2008)의 수리 및 수치모델실험의 결과에 대해 비교·검증을 진행하였다.

직립구조물에 대한 입사파랑의 입사각도(*β*) 10°, 19°, 28°에 대하여 직립구조물 의 길이방향에 따른 상대파고의 분포와 직립구조물의 법선방향에 따른 상대파고 의 분포를 Figs. 2.22~2.27를 통해 나타내었으며, 모든 입사각도(*β*)에 대하여 해 석모델의 결과와 Lee and Yoon(2008)의 수리 및 수치모델실험의 결과의 분포가 유사한 패턴을 띄고 있다.

이를 통해 Boussinesq 방정식 해석모델이 세장형 복합방파제로부터 발생하는 연파의 특성을 확인하기 위한 수치모델실험에 적합한 해석모델이라고 사료된다.



breakwater(y) from irregular wave models,  $\beta = 10^{\circ}$ 



Fig. 2.25 Comparison of normalized wave heights perpendicular to the breakwater(y) from regular wave models,  $\beta = 19^{\circ}$ 



Fig. 2.27 Comparison of normalized wave heights perpendicular to the breakwater(y) from regular wave models,  $\beta = 28^{\circ}$ 

# 제 3 장 수치모델의 수립

### 3.1 대상해역의 특성

Collection @ kmou

본 연구의 대상지역인 한국가스공사 삼척본부 LNG 생산기지는 동북권에 위치하고 행정구역은 강원도 삼척시 원덕읍 호산해변길 18으로, 서쪽은 정선 군과 태백시에 남쪽은 경상북도 울진군과 봉화군에 북쪽은 동해시에 접하여 강원도 2개시와 1개군 및 경상북도 2개군과 경계를 이루고 있다(Fig. 3.1.).

삼척본부 LNG 생산기지는 급격히 증가하는 천연가스 수요 대응 및 전국 환상배관망 구축을 위해 건설되었으며 평택, 인천, 통영에 이어 대한민국 천 연가스 제4기지로서 중부 및 강원, 영남권역에 천연가스를 안정적으로 공급 하고 있다. 삼척 LNG 생산기지는 약 98만 의 부지에 LNG 저장탱크 12기 (27만k纪급 3기, 20만k纪급 9기)와 시간당 1,320톤 규모 ORV식 기회송출설비, LNG 선 12.7만 DWT(27aksk纪급) 1선좌 접안설비를 갖추고 있으며, LNG 생 산기지의 항내 정온도 및 선박과 LNG 생산설비의 보호를 위한 국내 최대 길 이 1.8km의 케이슨 방파제 및 LNG 생산기지와 인접해 있는 삼척 화력발전 소 전면 해안에 위치한 900m 길이의 동방파제가 LNG 기지로부터 약 1.0km 떨어져 세장형 복합방파제의 배치를 이루고 있다(Fig. 3.2.).

LNG 생산기지를 포함하는 해역은 지리적 특성상(동해안) 조석 및 조류에 의한 영향보다는 외해로부터 진입하는 파랑의 영향이 지배적이며, 연안으로 부터 떨어져있는 세장형 복합방파제에서 발생하는 연파로 인한 통행 선박의 항로 이탈의 우려 및 방파제의 이격구간으로 인해 항내로 진입하는 파랑의 영향, 선박에 의한 항내의 항주파와 항만구조물에서의 다중반사파로 인한 항 내 정온도의 저감 등 복합적인 특성을 지니고 있다.

# 3.2 대상해역의 조건

# 3.2.1 기상 조건

대상해역은 15.0m ~ 25.0m 내외의 비교적 깊은 수심 분포를 형성하고 있 다(Fig. 3.2). 이 지역의 30년간의 기상통계자료(1981 ~ 2010, 울진)인 평년값 자료(30년)에 의하면, 강수량은 연평균 1,119mm로서 12월에 33.4mm로 최소, 8월에 208.8mm로 최대치를 보인다. 연평균기온은 12.6°C이며 최고 기온은 여 름철 27.2°C이고, 최저 기온은 겨울철인 1월에 -3.2°C로 나타나고 있다. 평균 풍속은 3.8m/s이고, 풍향별 출현율은 W방향이 우세하게 나타나고 있다.



Fig. 3.1 Location map of object area



## 3.2.2 해상 조건

Collection @ kmou

## 1) 파랑

대상해역의 지리적 특성으로 동절기에는 시베리아 고기압 및 동해선풍에 의한 NE, E 계열의 파랑이 우세하게 나타나며, 하절기에는 태풍에 의한 S 계열의 파랑이 우세하게 나타난다. 한국해양수산개발원(2008. 6)에 의한 대상 해역의 심해설계파와 천해설계파 제원은 Table 3.1과 같다.

Deep water design wave					
Wave Direction	Wave Height (m)	Wave Period (sec)			
SE	7.9	12.1			
NE	6.3	11.6			
ENE	8.4	13.2			
Е	7.2	11.9			
Shallow water design wave					
Wave Direction	Wave Height (m)	Wave Period (sec)			
SE	6.0	12.1			
NE	5.5	11.6			
ENE	7.5	13.2			
Е	6.0	11.9			

Table 3.1 Design waves of deep and shallow water for the object area

#### 2) 조석

대상해역은 동해안의 조석특성을 따르며 일조부등이 매우 현저하게 나타나 고, 1일 1회조를 나타내고 있다. 조시의 부등은 고조에 크고, 조고의 부등은 저조에 크나 고고조 다음 저저조가 발생한다. 삼척 LNG 생산기지에 인접하 고 있는 호산항의 대조차는 15.0cm, 평균조차는 11.6cm, 소조차는 8.2cm를 나타내고 있다.

#### 3) 조류

대상해역의 조류는 일반적으로 연안부근에서 일정한 크기를 갖는 조류형태 는 확인할 수 없으며, 다만 바람에 의해 생기는 미약한 표면류와 해류에 의 해 발생되고 있다. 대상해역의 조차는 30cm 내외로 변화가 거의 없기 때문에 조류유속은 10~20cm/s 정도이며, 창조류는 북류, 낙조류는 남류의 일반적인 경향을 띈다.



Fig. 3.3 Counter and water facilities of samcheok LNG production base

# 3.3 대상구조물의 조건

대상구조물은 삼척 LNG 생산기지로부터 전면으로 약 1.0km 떨어져 위치 한 이안식 세장형 복합방파제로서, 외해로부터 입사하는 파랑으로부터 LNG 생산기지의 항만시설 보호 및 정온도 확보를 목적으로 하는 길이 1.8km의 방 파제(A breakwater)와 삼척 그린파워 기지의 항만시설 및 선박의 보호, 풍력 및 파력발전을 목적으로 하는 길이 900m의 방파제(B breakwater)로 구성되 어 있다(Fig. 3.3).



Fig. 3.4 Long and serial breakwaters at object area

# 3.3.1 A breakwater

Collection @ kmou

삼척 그린파워 방파제(A breakwater)는 총 길이 900m의 세장형 복합방파

제로서 케이슨 1함당 폭 24.9m, 길이 9.1m, 높이 24.0m(제간부 파력발전구간 기준)의 혼성케이슨형식으로 케이슨 내부는 정사각형의 격실로 구성되어 있 다. 기초사석부는 세굴방지공 보강구간을 적용하였으며, 평균 수심 최대 29m 까지 사석을 투하하고 마루높이는 항만 및 어항설계기준, 전달 파고, 동해안 대형 방파제의 마루높이를 비교 분석하여 해수면으로부터 9m 높이로 축조하 였다.



Fig. 3.5 Sectional view of serial breakwaters(A breakwater)

### 3.3.2 B breakwater

LNG 생산기지 방파제(B breakwater)는 총 길이 1.8km(케이슨 72함)의 세

- 57 -

장형 복합방파제로서 케이슨 1함당 폭 32.5m, 길이 24.9m, 높이 24.0m의 반 원형의 이중 슬릿 케이슨형태로 케이슨 내 해수 유통이 가능하도록 해수 유 통구와 유수실이 구성되어 있으며, 케이슨 1함의 무게는 약 9000t~1만1200t 이다. 평균 수심 최대 26m까지 사석을 투하하고, 마루높이는 항만 및 어항설 계기준, 전달 파고, 동해안 대형 방파제의 마루높이를 비교 분석하여 해수면 으로부터 9m 높이로 축조하였으며, 설계유의파고는 7.6m, 내진설계 기준은 2 등급 붕괴방지 수준으로 설계되었다.





## 3.4 수치모델의 구성

#### 3.4.1 규칙파 해석모델의 구성

대상해역의 세장형 복합방파제로 입사하는 파랑의 특성을 규칙파로 설정하 고, 확장형 완경사방정식 해석모델인 CG-WAVE를 통해 해석( N Type), 이를 바탕으로 구조물 전면에 따른 규칙파의 연파 특성을 확인하고자 한다. 계산영역의 범위는 국가무역항인 호산항 및 한국남부발전의 삼척 그린파워, 한국가스공사삼척본부의 LNG 생산기지를 포함하는 연안역으로, 동서로 2.5km, 남북으로 5.0km로 설정하였다. 해석모델의 격자체계는 유한요소법 (Finite Element Method)으로서 총 224,433개의 삼각요소 격자망으로 구성되 어 있으며, 요소의 크기는 10m이다. 또한 해석모델 내부의 비선형 파라미터 들을 통해 계산영역의 세부적인 지형변화 등에 따른 파랑변형을 고려할 수 있도록 설정하였으며, 격자와 요소 간 간격은 입사파랑의 파장분해가 원활하 게 이뤄지는 해상도를 고려하여 구성하였다.

일반적인 직립구조물의 경우 파랑에 의한 반사계수(reflection coefficient) 값을 0.95로 적용하지만(Table 2.2), B breakwater의 경우 반원형 슬릿케이슨 공법의 적용을 통한 반사파의 저감효과를 고려한 값인 0.5를 적용하였다.

### 3.4.2 불규칙파 해석모델의 구성

대상해역의 세장형 복합방파제로 입사하는 파랑의 특성을 불규칙파로 설정 하고, Boussinesq 방정식 해석모델인 BOUSS-2D를 통해 해석(*N*-*L* Type), 이를 바탕으로 구조물 전면에 따른 규칙파의 연파 특성을 확인하고자 한다. 계산영역의 범위는 규칙파 모델과 동일한 국가무역항인 호산항 및 한국남부





Fig. 3.6 Numerical mesh of CG-WAVE under regular wave condition

CG-WAVE Model Condition			
Target range (m)	2500 by 5000		
Element space (m)	10		
Number of elements	244,433		
Wave breaking parameter	0.15		
Friction parameter	0.12		
Boundary condition	parabolic approximation		
Open boundary	Semicircular		
Reflection coefficient	0.5(A) / 0.95(B)		

# Table 3.2 Numerical model experiment conditions under regular wave


발전의 삼척 그린파워, 한국가스공사삼척본부의 LNG 생산기지를 포함하는 연안역으로, 동서로 2.5km, 남북으로 5.0km로 설정하였다. 해석모델의 격자체 계는 유한차분법(Finite Difference Method)과 시간 도메인(Time domain)의 결합으로서 총 125,000개의 사각요소 격자망으로 구성되어 있으며, 요소의 크 기는 10m이다. 또한 해석모델 내부의 파라미터들을 통해 계산영역의 세부적 인 지형변화 등에 따른 파랑변형을 고려할 수 있도록 설정하였으며, 격자와 요소 간 간격은 입사파랑의 파장분해가 원활하게 이뤄지는 해상도를 고려하 여 구성하였다.



Fig. 3.7 Numerical mesh of BOUSS-2D under irregular wave condition



BOUSS-2D Model Condition					
Target range (m)	2500 by 5000				
Element space (m)	10				
Number of elements	125,000				
Spectrum	JONSWAP				
Peak enhancement parameter,	3.3				
Smagorinsky number	0.02				
Direction dispersion angle, $\sigma$	$10^{\circ} \sim 30^{\circ}$				
Damping laver	100m(outside) / 5m(breakwater)				

Table 3.3 Numerical model experiment conditions under irregular wave

# 3.4.3 파랑제원의 구성

대상해역으로 입사하는 파랑의 조건은 LNG 생산기지에서 발생하는 연 출 현빈도 97.5%의 평상파랑의 제원을 적용하였으며, 세장형 복합방파제에서 연 파가 발생할 수 있는 입사각을 지닌 북측 계열파랑과 남측 계열파랑으로 선 정하였다. 파랑의 제원은 다음과 같다(Table 3.4).

세장형 복합방파제와 입사파랑이 이루는 입사각(β)을 방파제의 배치각도에 따라 분류하기 위하여 방파제를 총 3 구간(STATION A, B, C)로 분리하였 으며, 이를 Table 3.5에 정리하였다.

Table 3.4 Wave	conditions	of	incidence	waves
----------------	------------	----	-----------	-------

Wave Direction	350°(N)	12°(N)	127°(S)	160°(S)
Wave Height, (m)	3.0	3.6	2.8	3.0
Wave Period, $T(sec)$	10.9	10.9	10.9	10.9





Fig. 3.8 Considered wave direction for evaluation of stem wave

Table	3.5	Incident	angle( $\beta$ )	according	to	station	of	breakwater
						15		

Wave Direction	350°(N)	12°(N)	127°(S)	160°(S)
at STATION A	13°	35°	53°	20°
eta at STATION B	25°	47°	18°	_
$\beta$ at STATION C	-	12°	30°	-

# 제 4 장 수치실험 및 분석

3장을 바탕으로 구성된 규칙파 및 불규칙파 해석모델을 통해 수치해석을 수행하였다. 대상해역에 위치하고 있는 세장형 복합방파제의 길이에 따른 파 고분포를 통해 연파 파고( t)의 성장 및 발달과 방파제의 법선방향에 따른 파고분포를 통해 연파 폭(B)의 단면을 분석하였다. 특히 구조물에 대한 파랑 의 입사각도()을 고려하여 구조물 전면에서의 연파특성을 분석하였다.

# 4.1 규칙파 해석모델의 실험결과

북측 계열 파랑에 대한 규칙파 해석모델의 실험결과는 다음과 같다.

Figs. 4.1~4.2는 북측 계열 파랑에 대한 규칙과 모델의 실험결과를 등파고 선도를 통해 나타낸 자료이며, 이를 통해 실험 영역 내에서의 전반적인 파랑 의 진행에 따른 파의 변형 및 파고의 분포를 확인할 수 있다. 입사파향은 진 북방향 기준, 우측으로 회전하여 증가하며, 파랑의 입사파향이 350°( =13°) 일 경우, STATION A의 전면을 따라 250m 구간까지 상대파고 값이 매우 소 폭 상승함을 확인 할 수 있으며, 이는 입사파랑과 제체가 이루는 입사각에 의 한 영향으로 사료된다. 본 케이스는 입사파향과 제체가 이루는 입사각이 20° 이하로서, 반사파는 발생하지 않고 오직 연파만이 발생한다는 Perroud(1957) 의 연파 발생 메커니즘에 부합하는 결과를 보인다. STATION B와 입사파랑 이 이루는 입사각 β는 25°로써, 입사파에 의한 반사파가 발생하며 제체의 길 이에 따른 상대파고의 분포는 미소한 변동폭을 갖는 것으로 보아 연파의 영 향은 미미한 것으로 판단된다. STATION C에서는 직접적인 파랑의 입사가



충분히 이루어지지 않아 STATION A,B와 비교하여 상대파고 값이 크게 감 소하지만 STATION C의 전면부를 따라 상대파고가 상승하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 STATION B에 입사하는 파랑의 입사각이 충분히 작아, 이를 따라 전파한 파랑이 구조물의 끝부분에서 회절 하여 STATION C의 전면부 를 따라 전파하며 연파현상을 나타낸 것으로 사료된다. 하지만 전반적으로 입 사파향 350°에 대하여 연파의 발생을 뚜렷하게 확인할 수 없었다.

입사파향이 12°( = 35°)일 경우, STATION A의 전면을 따라 초기 100m 구간에서 상대파고 값이 1.35로 상승함을 확인 할 수 있으며, 이는 입사파향 350°의 경우와 마찬가지로 파랑의 입사각도에 의해 발생하는 현상으로 보인 다. STATION B,C에서는 상대파고의 변화를 크게 확인할 수 없는데, 이는 연파 및 파랑에 의한 영향을 저감하기 위해 적용한 제체의 형상을 고려한 반사계수의 영향으로 판단되며, 전반적으로 뚜렷한 연파현상을 확인할 수 없 었다.

남측 계열 파랑에 대한 규칙파 해석모델의 실험결과는 다음과 같다.

Figs. 4.3~4.4는 남측 계열 파랑에 대한 규칙과 모델의 실험결과를 등파고 선도를 통해 나타낸 자료이며, 이를 통해 실험 영역 내에서의 전반적인 파랑 의 진행에 따른 파의 변형 및 파고의 분포를 확인할 수 있다. 입사파향은 진 북방향 기준, 우측으로 회전하여 증가하며, 입사파향이 127°(β=53°)일 경우, 연파가 발생할 수 있는 충분한 입사조건이 마련되지 않으므로 STATION C 에서의 초기 상대파고가 1.3까지 증가하는 이유는 입사파와 반사파로 인한 중 복파의 영향이라 사료되며, 이는 제체의 법선방향에 따른 상대파고의 분포를 통해서 확인할 수 있다. 다음과 같은 중복파의 영향에 의해 STATION B에 18°의 입사각으로 입사해야 할 파랑의 진행이 방해를 받아 STATION B에서 의 연파 현상을 관찰하기 힘든 것으로 보인다. STATION A에서의 200m 구 간까지의 상대파고는 1.25까지 상승하며, 이는 STATION C에서 회절되어 STATION B를 따라 전파되어진 입사파랑이 복합방파제의 이격구간으로 인 해 STATION A의 초기 모서리에서 회절되어 발생하는 영향 및 입사각 ( = 30°)의 영향으로 보인다.

입사파향이 160°( = 20°)일 경우, STATION A의 전면을 따라 250m 구간 까지 상대파고 값이 1.25로 소폭 상승함을 확인 할 수 있으나, 이후 지속적으 로 상대파고가 감소함을 확인할 수 있으며, 이는 전술한 제체의 반사계수의 영향으로 인해 파랑이 충분히 제체를 따라 진행하지 못하고 소산된 것으로 보인다. STATION B 와 A에서는 직접적인 파랑의 입사각도가 생성되지 않 기에 상대파고의 값이 현저히 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 다른 케이스 들과 마찬가지로 전반적으로 뚜렷한 연파현상을 확인할 수 없었다.







Fig. 4.1 Wave height distribution of CG-WAVE, wave direction =  $350^{\circ}(N)$ 



Fig. 4.2 Wave height distribution of CG-WAVE, wave direction =  $12^{\circ}(N)$ 



Fig. 4.3 Wave height distribution of CG-WAVE, wave direction =  $127^{\circ}(S)$ 



Fig. 4.4 Wave height distribution of CG-WAVE, wave direction =  $160^{\circ}(S)$ 

### 4.2 불규칙파 모델의 실험결과

북측 계열 파랑에 대한 불규칙파 해석모델의 실험결과는 다음과 같다.

Figs. 4.5~4.6은 북측 계열 파랑에 대한 불규칙파 모델의 실험결과를 등파 고선도를 통해 나타낸 자료이며, 이를 통해 실험 영역 내에서의 전반적인 파 랑의 진행에 따른 파의 변형 및 파고의 분포를 확인할 수 있다. 입사파향은 진북방향 기준, 우측으로 회전하여 증가하며, 입사파향이 350°( =13°)일 경 우, STATION A의 길이 방향을 따라 상대파고 값이 1.75 까지 상승함을 확 인 할 수 있다. 이는 파랑의 입사각도에 의해 발생하는 연파의 영향이라 사료 되며, 규칙파 모델에서와 마찬가지로 서론부에 전술한 Perroud(1957)의 연파 메커니즘에 부합하는 결과를 보이고 있다. 복합방파제의 이격구간에 의해 STATION B 초기 구간에서 상대파고가 1.25까지 감소하나, 이후 파랑의 입 사각도( = 25°)에 의한 연파의 영향으로 인해 상대파고 값이 1.75까지 재증 가하는 것을 확인할 수 있다. 규칙파의 상대파고 분포와 마찬가지로 STATION C에서는 파랑이 직접적으로 입사하지 않아 상대파고 값이 크게 감소하지만, STATION C의 전면부를 따라 상대파고 값이 상승하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 STATION B에 입사하는 파랑의 입사각이 충분히 작 아, 이를 따라 전파한 파랑이 구조물의 끝부분에서 회절 하여 STATION C 의 전면부를 따라 전파하며 발생하는 현상으로 보인다.

입사파향이 12°(β=35°)일 경우, STATION A의 전면을 따라 300m 구간 까지 상대파고 값이 1.75로 상승함을 확인할 수 있으며, 이 역시 파랑의 입사 각도에 의해 발생하는 연파의 영향으로 판단된다. 하지만 입사파향 350°의 경 우와 달리, 지속적으로 상대파고를 유지하지 못하고 제체 300m 구간부에서 상대파고가 감소하는 현상을 보이게 되는데 이는 파랑의 입사각으로 인해 발

생하는 반사파의 영향이 작용한 것으로 사료된다. STATION B에서는 연파 가 발생할 수 있는 충분한 입사조건을 갖지 못하지만( =47°), 상대파고가 1.75까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 STATION A로부터 전파되어 진 파랑의 영향과 입사파와 반사파에 의한 중복파의 영향으로 인해 발생하는 것이라 사료된다. STATION C에서는 파랑의 입사각(β=12°)으로 인해 발생 하는 연파로 인해, 제체의 길이방향에 따른 상대파고의 지속적인 상승이 발생 함을 확인할 수 있었다.

남측 계열 파랑에 대한 불규칙파 해석모델의 실험결과는 다음과 같다.

Figs. 4.7~4.8은 남측 계열 파랑에 대한 불규칙과 모델의 실험결과를 등과 고선도를 통해 나타낸 자료이며, 이를 통해 실험 영역 내에서의 전반적인 파 랑의 진행에 따른 파의 변형 및 파고의 분포를 확인할 수 있다. 입사파향은 진북방향 기준, 우측으로 회전하여 증가하며, 입사파향이 127°( = 53°)일 경 우, 규칙과 모델의 조건과 마찬가지로 연과가 발생할 수 있는 충분한 입사조 건이 마련되지 않아, STATION C에서의 초기 상대파고의 증가는 반사파와 입사파의 중복파의 영향이라 사료되며, 이는 제체의 법선방향에 따른 상대파 고의 분포를 통해서 확인할 수 있다. 또한 규칙과 모델의 해석결과와 마찬가 지로 STATION C에서 발생한 중복파의 영향으로 인해 STATION B에 충분 한 파랑이 입사되지 못하며, 이는 입사각(β=18°)을 통해 STATION B에서 발생되어야 할 연파의 성장을 억제하는 것으로 사료된다. STATION A에서 의 상대파고 상승은 복합방파제 이격구간으로 인해 STATION B를 따라 전 파되어진 파랑이, STATION A의 초기 모서리에서 회절됨으로 인한 영향과 파랑의 입사각의 영향(β=30°)이 중첩되어 발생하는 것으로 사료된다.

입사파향이 160°(β=20°)일 경우, STATION C의 전면을 따라 초기 100m 구간까지 상대파고가 2 까지 급속도로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는



Park(2002)이 연파의 공간적 특성분포를 제시함에 있어 연파의 최대파고는 입사파고의 2배까지 상승함을 언급한 대목에 부합하는 결과를 나타낸다. STATION A,B는 규칙파 모델의 해석결과와 마찬가지로 파랑이 직접적으로 입사하지 않아 상대파고의 값이 현저히 감소하였지만, STATION C를 따라 전파된 파랑의 영향으로 인해 STATION B에서, 제체의 길이방향을 따라 상 대파고의 상승이 나타나며, STATION A에서도 마찬가지로 STATION B를 따라 전파한 파랑의 복합방파제 이격구간으로 인한 회절현상에 의해 복잡한 형태의2차 연파의 성장을 STATION C으로부터 확인할 수 있었다. 특히, 남 측 계열 파랑이 입사할 경우, 복합방파제의 이격구간을 통해 방파제 내측으로 파랑이 입사하여 제체 모서리부분을 통해 파가 회절되어지는 모습을 등파고 선도를 통해 확인할 수 있다.





Fig. 4.5 Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction =  $350^{\circ}(N)$ 



Fig. 4.6 Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction =  $12^{\circ}(N)$ 



Fig. 4.7 Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction =  $127^{\circ}(S)$ 



Fig. 4.8 Wave height distribution of BOUSS-2D, wave direction =  $160^{\circ}(S)$ 

Figs. 4.9~4.12는 북측 계열 파랑에 대한 해석모델의 실험결과를 제체의 길이에 따른 상대파고 분포와 제체 길이의 절반 지점에서의 법선 방향에 따 른 상대파고 분포를 제시한 그래프이며, Figs. 4.13~4.16은 남측 계열 파랑에 대한 해석모델의 실험결과를 그래프로 제시한 자료이다. 규칙파랑 해석모델의 결과와 불규칙파랑 해석모델의 결과는 전반적인 입장에서 비슷한 추세를 띄 고 있지만, 규칙파 해석모델에 비하여 불규칙파 해석모델에 의한 파랑반응이 현저히 뚜렷하고 예민함을 확인할 수 있다.

Figs. 4.17~4.20은 해석모델의 실험결과를 북측 및 남측 계열로 분리하여 종합한 그래프이다.







Fig. 4.10 Relative wave height of distance normal to the structure, wave direction = 350°(N)



Fig. 4.12 Relative wave height of distance normal to the structure, wave direction =  $12^{\circ}(N)$ 



Fig. 4.14 Relative wave height of distance normal to the structure, wave direction = 127°(S)

- 81 -



Fig. 4.16 Relative wave height of distance normal to the structure, wave direction =  $160^{\circ}(S)$ 



Fig. 4.18 Relative wave height of distance normal to the structure, north series



Fig. 4.20 Relative wave height of distance normal to the structure, south series

# 제 5 장 결론

급격한 시대의 변화와 지속적인 기술혁신이라는 세계적인 흐름 속에 오늘날 의 항만은 계속해서 그 모습을 진화하고 있으며, 특히 선박의 대형화로 인한 대수심역에서의 항만 구조물 설계는 외해로부터 내습하는 파랑에너지의 영향에 대한 정확한 구조물의 응답해석 및 파랑변형의 해석이 요구되는 바, 본 논문은 한국가스공사 삼척본부 LNG 생산기지 전면해역에 위치하고 있는 세장형 복합 방파제에 대한 연파의 해석을 진행하였다. 연구의 진행은 대상해역의 지리적· 계절적 특성과 복합방파제에서 연파를 유발할 가능성을 지닌 파랑 제원을 토대 로 수치모델실험을 수행하였으며, 규칙파 해석모델인 확장형 완경사 방정식 모 델 및 불규칙파 해석모델인 Boussinesq 방정식 모델을 적용하여 구조물의 길 이 방향 및 법선 방향에 따른 상대파고분포를 통해 연파의 특성을 해석하였다.

#### 연구과정에 의하여 도출된 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1945

(1) 수치모델실험에 적용하였던 규칙과 해석모델 및 불규칙과 해석모델 모 두 기존의 연구자료를 기반으로 적용성 검토를 진행하였으며, 실제해역에 위 치하고 있는 복합방파제에서 발생하는 연파를 해석하기에 적합하다고 판단된 다. 실제 수치모델실험결과 규칙과 및 불규칙과 해석모델 모두 전체적으로 뚜렷한 연파의 패턴을 나타내고 있지 않으나, 상대적으로 규칙과 해석모델인 CG-WAVE에 비해 불규칙과 해석모델인 BOUSS-2D 모델에서 확연한 연파 의 성장을 확인할 수 있었다. 이는 해석모델의 지배방정식의 차이에서 발생 하는 민감도의 영향 및 복합방파제에서 발생하는 입사파에 의한 반사파의 구 현방식의 차이에서 발생하는 것으로 보이며, 또한 복합방파제에 대한 파랑의 입사각도()의 증가함에 따라 규칙과 해석모델에서의 파랑해석결과는 정상파



(standing wave)의 패턴을 나타내는데 반해 불규칙과 해석모델에서는 이러한 현상이 줄어든 것으로 보이는데 이는 불규칙과 해석모델에 적용된 파랑의 비 선형성의 영향이라고 사료된다.

(2) 수치모델실험에서 발생하는 연파의 파고 상승은 구조물의 입사지점으로 부터 초기에 진행되며 입사파고의 1.25~2.0배에 해당하는 파고까지 성장하지 만, 이는 지속적으로 성장하는 것이 아닌 일반적으로 파장의 8배에 해당하는 거리에 도달했을 경우 더 이상 파고가 상승하지 않는 안정화 구간이 발생하 게 된다. 연파의 성장률은 구조물과 입사파랑이 이루는 입사각도( )에 의한 영향이 지배적이며, 복합방파제의 배치구조에 의해 각 STATION에서 발생하 는 파랑의 변형이 다른 STATION에서의 파랑변형을 유도하게 되므로 이를 고려한 구조물의 배치가 중요할 것으로 보인다. 특히, 복합방파제라는 구조물 의 배치로 인해 발생하는 이격구간은 항내로의 파랑의 유입을 허용하게 되 며, 연파의 현상은 구조물에 의한 회절현상의 일부라는 점을 충분히 고려해 야 할 것으로 보인다.

(3) 350°(β=12°)의 파향을 지닌 북측계열 파랑이 STATION A에 입사하 게 될 경우, 160°(β=20°)의 파향을 지닌 남측계열 파랑이 STATION C에 입사하게 될 경우이며 양측 케이스 모두 연파의 발생 메커니즘에 입각하여 입사파에 의한 반사파를 생성하지 않고, 오직 연파만을 발생시키는 입사각도 (β)를 지니고 있다. 특히, 160°(β=20°)의 파향을 지닌 남측계열 파랑의 경 우, STATION C를 제외한 STATION A·B에는 입사하는 각도를 갖지 못하 지만 STATION C와 STATION B가 이루는 각으로 인한 파랑의 회절 현상 에 의해 이후의 구간에서도 미미하지만 연파의 패턴을 나타내고 있다.

(4) 기존 항만 외곽시설에 주로 이용되었던 단일형 직립 방파제 형상에서는

- 86 -

찾아볼 수 없는 세장형 복합방파제만의 이격구간 및 파랑의 입사각도의 차이 로 인해 한층 복잡한 형태의 2차 연파(secondary stem wave)의 성장을 확인하 였고, 이는 방파제 외항 측면 뿐만 아니라 내항 측면에서도 충분히 2차 연파의 영향이 전달될 가능성이 존재한다고 볼 수 있으며, 이로 인한 항내 정온도 및 선박의 항행 안정성 저감을 예상할 수 있다. 따라서 향후 복합방파제의 배치 형상으로 인해 발생하는 2차 연파가 항내에 미치는 영향에 대한 검토가 이루 어져야 한다고 판단된다.

이상으로 본 연구에서는 실제해역에 위치한 세장형 복합방파제로부터 발생 하는 연파의 해석을 위하여 연안역으로 입사하는 파랑의 변형 및 천수효과를 충분히 재현할 수 있는 수치모델을 적용하였다. 비록 전반적으로 뚜렷한 연 파의 패턴을 확인할 수는 없었지만, 이는 실제 해역의 파랑특성인 비선형성 및 복합방파제가 갖는 반사율의 영향을 충분히 고려하였기 때문이라고 보이 며 일반적인 직립방파제에서 확인할 수 없었던 2차 연파의 성장을 발견할 수 있었다.

본 연구를 통하여 도출된 해석결과는 실제 해역의 연안 및 항로 입구에서 항행하는 상황을 가장한 선박운항시뮬레이션 혹은 선박의 계류안정 테스트에 적용할 수 있을 것으로 보이며, 향후 복합방파제에서 발생할 수 있는 2차 연 파의 저감을 위한 연구의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

- 87 -

# 참고문헌

한국남부발전(주)(2011), 삼척화력방파제 설계용역보고서

Berkhoff, J. C. W.(1972), "Computation of Combined refraction – Diffraction", Proc. 13th International Coastal Engineering Conference, pp. 741–790.

Dally, W. R., Dean, R. G., and Dalrymple, R. A.(1985), "Wave Hieght Variation across Beaches of Arbitrary Profile", J. Geophys Research, Vol. 90, pp. 11917–11927.

Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A.(1984), "Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 110, pp. 67–79.

Demirbilek, Z.(1994), Comparison between REFDIFS and CERC Shoal Laboratory Study, Unpublished Report, Waterways Exp. Station, Vicksburg, MS, p. 53.

Cavaleri, L., P. Malanotte-Rizzoli. (1981), "Wind wave prediction in shallow water. Theory and applications", J. Geophys. Res., Vol. 86, No. C11, 10, pp. 961–1000.

KMA home page, http://www.kma.go.kr/weather/observation/marine\_buoy.jsp https://data.kma.go.kr/climate/average30Years/selectAverage30YearsKoreaList. do?pgmNo=188

Lee, J. I. and Yoon, S. B.(2006), "Hydraulic and Numerical Experiments of



- 88 -

Stem Waves along a Vertical Wall", J. The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, Issue 4B, pp. 405-412.

Lee, J. I., Kim, Y. T., and Yoon, S. B.(2007), "Stem Wave Analysis of Regular Waves using a Boussinesq Equation", J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 19, Issue 6, pp. 446–456.

Lee, J. I., Choi, J. W., and Yoon, S. B.(2008), "Hydraulic Experiments of Stem Waves along a Vertical Wall due to Unidirectional Random Waves", J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, Issue 1, pp. 49<sup>-61</sup>

Li, B.(1994). A Generalized Conjugate Gradient Model for the Mild Slope Equation, Coastal Engineering, Vol. 23, pp. 215–225.

Mase, H., Memita, T., Yuhi, M., and Kitano, T.(2002), "Stem waves along vertical wall due to random wave incidence", Coastal Engineering, Vol 44, Issue 4, pp. 339–350.

Mei, C. C.(1983), The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley & Sons.

Nwogu, O. G.(1993), "Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering", ASCE, Vol. 119, Issue 6, pp. 618–638.

Nwogu, O. G.(1996), "Numerical prediction of breaking wave and currents with a Boussinesq model", the 25th International conference on Coastal Engineering, ICCE'96, Orlando, FL.

Nwogu, O. G. and Demirbilek, Z. (2001), "BOUSS-2D: A Boussinesq wave model for Coastal Regions and Harbors", ERDC/CHL TR-01-25, USACE, WA.



Panchang, V. G., Ge, W., Cushman-Roisin, B., and Pearce, B. R.(1991), "Solution to the Mild-Slope Wave Problem by Iteration, Applied Ocean Research", Vol. 13, Issue 4, pp. 187–199.

Park, H. B., Yoon, H. S., and Ryu, C. R.(2003), "A Study on the Characteristics of the Stem Wave in front of the Coastal Structure", J. Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 17, Issue 5, pp. 25–31.

Perroud, P. H.(1957), "The solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence", Univ. of Calif. Berkeley, IER Rept. No. 99–3, p. 93.

Samcheok city home page, http://www.samcheok.go.kr/media/00088/00129.web

Yoo, H. S., Kim K. H., and Jung E. J.(2010), "Hydraulic Experiments of Stem Waves due to Multi-Directional Random Waves along a Vertical Caisson", J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 22, Issue 6, pp. 429–436.

Wiegel, R. L., 1964. Oceanographical Engineering, Prentice Hall., p 532.

Woo, J. H.(2016), "Numerical Analysis of Stem Wave Control Effect of Curvy Slit Caisson Using OpenFOAM", Graduate school of Civil engineering, Univ. of Seoul.

